



TUGAS AKHIR - TE 141599

**KOORDINASI PROTEKSI ARUS LEBIH ADAPTIF PADA
SISTEM DISTRIBUSI *RING* DENGAN PEMBANGKIT
TERSEBAR MENGGUNAKAN *ARTIFICIAL NEURAL
NETWORK***

M. Alfian Fadli Jauhari
NRP 2213100052

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiانتara, MT.
Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE 141599

**COORDINATION PROTECTION ADAPTIVE OVERCURRENT
RELAY IN RING SYSTEM WITH DISTRIBUTED
GENERATIONS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK**

M. Alfian Fadli Jauhari
NRP 2213100052

Advisor
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT.

DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“KOORDINASI PROTEKSI ARUS LEBIH ADAPTIF PADA SISTEM DISTRIBUSI RING DENGAN PEMBANGKIT TERSEBAR MENGGUNAKAN *ARTIFICIAL NEURAL NETWORK*”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2017

M.Alfian Fadli Jauhari

NRP. 2213 100 052

**KOORDINASI PROTEKSI ARUS LEBIH ADAPTIF PADA
SISTEM DISTRIBUSI RING DENGAN PEMBANGKIT
TERSEBAR MENGGUNAKAN ARTIFICIAL NEURAL
NETWORK**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga

Departemen Teknik Elektro

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing 1

Dr. Ir. Margo Pujiatara, MT.
NIP. 1966 03 18 1990 10 1 001

Dosen Pembimbing 2

Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT.
NIP. 1981 09 05 2005 01 1 002



KOORDINASI PROTEKSI ARUS LEBIH ADAPTIF PADA SISTEM DISTRIBUSI *RING* DENGAN PEMBANGKIT TERSEBAR MENGGUNAKAN *ARTIFICIAL NEURAL NETWORK*

Nama : M.Alfian Fadli Jauhari
Pembimbing I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Pembimbing II : Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT.

ABSTRAK

Penggunaan sistem jaringan distribusi *ring* memiliki permasalahan yang kompleks. Disamping itu dengan adanya penambahan pembangkit tersebar (*Distributed Generation*) akan mengakibatkan topologi jaringan berubah-ubah. Hal tersebut disebabkan karena kondisi operasi pembangkit yang dapat berubah yaitu ketika kondisi *grid on*, DG 1 *on*, DG 2 *on*, lalu terhubung *grid on* dan DG 2 *on*, lalu terhubung *grid on* dan DG 1 *on*, dan yang terakhir pada kondisi *grid on*. Hal tersebut dapat mengakibatkan adanya perubahan arus hubung singkat sehingga diperlukan koordinasi proteksi yang baik pada sistem jaringan distribusi *ring*. Koordinasi proteksi yang dilakukan harus mempertimbangkan nilai arus gangguan dan arah arus gangguan. Arah arus gangguan harus diperhitungkan dengan baik pada arah *forward* maupun *reverse*. Dari permasalahan tersebut maka dibutuhkan metode untuk mengurangi kompleksitas koordinasi proteksi pada sistem jaringan distribusi *ring*. Pada tugas akhir ini akan digunakan metode pengaman yang adaptif, yang memanfaatkan ANN (*Artificial Neural Network*) untuk mengatasi kendala tersebut di sistem distribusi *ring*. *Artificial Neural Network* digunakan untuk memodelkan sistem, yang nantinya akan menghasilkan *setting* rele yang mampu mengikuti perubahan kondisi pada sistem. Parameter yang menjadi *output* dari *Artificial Neural Network* adalah nilai TDS (*Time Dial Setting*) dan nilai *Ipickup*.

Kata Kunci : Sistem Jaringan Distribusi *Ring*, *Artificial Neural Network*

~ Halaman ini sengaja dikosongkan ~

COORDINATION PROTECTION ADAPTIVE OVERCURRENT RELAY IN RING SYSTEM WITH DISTRIBUTED GENERATION USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

Name : M.Alfian Fadli Jauhari
Advisor I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Advisor II : Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT.

ABSTRACT

The use of the ring distribution network system has a complex problem. Other than that, the addition of Distributed Generation will lead to a changing network topology. This is caused by the generator's operating conditions that could change, the conditions are grid on, DG 1 on, DG 2 on, then connected to the grid on and DG 2 on, then connected the grid on and DG 1 on, and the last condition is the grid on condition. These condition can result into a change of short circuit current, so it is necessary to have a good protection coordination in a ring distribution network. Protection coordination undertaken should consider the value of the fault current and it's direction. Direction of fault current must be reckoned with either in the direction of forward or reverse. From the problems stated before, a method to reduce the complexity of protection coordination system of ring distribution network is needed. An adaptive protection method, using ANN (Artificial Neural Network) to address the constraints in the ring distribution system will be used in this final project. Artificial Neural Network is used to model the system, which later would result into a relay setting which is able to follow the condition changes on the system. The parameters that will be the output of the Artificial Neural Network is the value of TDS (Time Dial Setting) and the value of Ipickup.

Keyword : Ring Distribution, Artificial Neural Network

~ Halaman ini sengaja dikosongkan ~

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin, puji serta syukur penulis ucapkan atas kehadiran Allah SWT yang telah banyak memberikan nikmat dari nikmat sehat dan nikmat ilmu sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir ini, yang berjudul : **“Koordinasi Proteksi Arus Lebih Adaptif Pada Sistem Distribusi Ring dengan Pembangkit Tersebar Menggunakan Artificial Neural Network”**.

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang berjasa terutama dalam penyusunan tugas akhir ini, yaitu :

1. Segenap keluarga, terutama kedua orang tua penulis, Bapak Mukarom dan Ibu Siti Zayyanah, serta adik tercinta, Nailun Najah Aljadidah yang telah banyak memberikan perhatian serta dukungan baik dalam doa maupun semangatnya.
2. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT., selaku dosen pembimbing 1 dan Bapak Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT. Selaku dosen pembimbing 2 yang telah memberi banyak ilmu dan arahan, semoga bapak sehat selalu dan diberi keberkahan ilmu.
3. Tanjung Raden Ajeng yang tidak henti-hentinya memberikan doa, semangat dan perhatian dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Rekan-rekan e53 terutama rekan Naga Sobung yang sudah memberikan dukungan luar biasa terhadap penulis.
5. Keluarga besar Kalpataru Elektro ITS terutama K30 yang selalu setia menjadi keluarga terdekat penulis.
6. Teman-teman Laboratorium Instrumentasi, Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST) terutama untuk Rahmat Febrianto Wijanarko yang selalu menjadi pemacu semangat dan tempat berbagi ilmu serta pengetahuan.
7. Tim riset rele adaptif, Bapak Anang Tjahjono dan Daeng Rahmatullah yang senantiasa membimbing, mengarahkan, dan berbagi ilmu serta pengetahuan pada riset ini.

Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat memberikan banyak manfaat. Jika terdapat kesalahan, penulis berharap adanya kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan dimasa mendatang.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

~ Halaman ini sengaja dikosongkan ~

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii

BAB I PENDAHULUAN..... 1

1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Metodologi.....	2
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
1.7 Relevansi.....	4

BAB II DASAR TEORI..... 5

2.1 Sistem Distribusi Ring.....	5
2.2 Proteksi pada Sistem Tenaga Listrik	6
2.3 Gangguan pada Sistem Tenaga Listrik	6
2.3.1 Gangguan Hubung Singkat	7
2.3.1.1 Gangguan Hubung Singkat Simetri.....	8
2.3.1.2 Gangguan Hubung Singkat Asimetri.....	9
2.3.1.3 Perhitungan Arus Hubung Singkat [2].....	9
2.3.2 Gangguan Beban Lebih	11
2.3.3 Gangguan Tegangan Lebih	11
2.4 Rele Pengaman pada Sistem Tenaga Listrik.....	12
2.4.1 Rele Arus Lebih (Over Current Relay)	12
2.4.1.1 Rele Arus Lebih Waktu Invers	13
2.4.1.2 Penyetelan Rele Arus Lebih Waktu Invers	15
2.4.1.3 Rele Arus Lebih Waktu Instan	16
2.4.1.4 Penyetelan Rele Arus Lebih Waktu Instan	16
2.4.2 Directional Over Current Relay (DOCR)	17
2.5 Pembangkit Tersebar (Distributed Generator).....	17
2.6 Artificial Neural Network (ANN)	19
2.6.1 Mengaktifkan Jaringan Saraf Tiruan	20

2.6.2	Backpropagation Neural Network.....	21
2.6.3	Metode Levenberg-Marquadt [5].....	22
BAB III PERANCANGAN SISTEM		25
3.1	Sistem Kelistrikan Distribusi Ring	25
3.2	Perubahan Kondisi Topologi Jaringan	27
3.2.1	Kondisi Grid, DG 1, dan DG 2 on (Kondisi 1).....	28
3.2.2	Kondisi Grid, dan DG 2 on (Kondisi 2)	28
3.3.3	Kondisi Grid, dan DG 1 on (Kondisi 3)	29
3.3.4	Kondisi Grid on (Kondisi 4)	29
3.3	Koordinasi Proteksi Adaptif Menggunakan Artificial Neural Network	30
BAB IV HASIL SIMULASI DAN ANALISIS		37
4.1	Analisa Hubung Singkat	37
4.2	Arus Hubung Singkat Maksimum pada Rele	38
4.2.1	Arus Hubung Singkat Kondisi 1	38
4.2.2	Arus Hubung Singkat Kondisi 2	39
4.2.3	Arus Hubung Singkat Kondisi 3	39
4.2.4	Arus Hubung Singkat Kondisi 4	40
4.3	Perhitungan Manual Koordinasi Proteksi Sistem Distribusi Ring	40
4.3.1	Kondisi Grid on, DG1 on, DG2 on	41
4.3.2	Kondisi Grid on, DG1 off, DG2 on.....	59
4.3.3	Kondisi Grid on, DG1 on, DG2 off.....	76
4.3.4	Kondisi Grid on, DG1 off, DG2 off	93
4.4	Penggunaan ANN pada Koordinasi Proteksi Adaptif	109
4.5	Hasil dan Analisa Hasil Koordinasi Proteksi dengan Menggunakan Artificial Neural Network	110
4.5.1	Hasil Koordinasi Saat Kondisi 1	113
4.5.2	Hasil Koordinasi Saat Kondisi 2	115
4.5.3	Hasil Koordinasi Saat Kondisi 3	117
4.5.4	Hasil Koordinasi Saat Kondisi 4	119
BAB V PENUTUP.....		121
5.1	Kesimpulan	121
5.2	Saran.....	121

DAFTAR PUSTAKA	123
BIOGRAFI PENULIS	125
LAMPIRAN	127

~ Halaman ini sengaja dikosongkan ~

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Konfigurasi Ring	5
Gambar 2. 2	(a) gangguan 3 fasa (L-L-L); (b) gangguan 3 fasa ke tanah (L-L-G)	8
Gambar 2. 3	Fasor Diagram Gangguan Simetri.....	8
Gambar 2. 4	(a)gangguan satu fasa ke tanah (1L-G);(b)gangguan antar fasa (L-L);(c)gangguan antar fasa ke tanah(2L-G)9	
Gambar 2. 5	(a) Komponen Urutan Positif; (b) Komponen Urutan Negatif; (c) Komponen Urutan Nol.....	9
Gambar 2. 6	Skema kerja rele arus lebih	12
Gambar 2. 7	Karakteristik Kurva Invers.....	14
Gambar 2. 8	Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Instan.....	16
Gambar 2. 9	Karakteristik Directional Over Current Relay	17
Gambar 2. 10	Model Tiruan Neuron	19
Gambar 2. 11	Arsitektur Jaringan Backpropagation	22
Gambar 3. 1	Single Line Diagram kondisi semua pembangkit on....	28
Gambar 3. 2	Single Line Diagram kondisi grid dan DG 2 on	28
Gambar 3. 3	Single Line Diagram kondisi grid dan DG 1 on	29
Gambar 3. 4	Single Line Diagram grid dalam kondisi on	29
Gambar 3. 5	Flowchart penggunaan algoritma Neural Network	30
Gambar 3. 6	Arsitektur Neural Network	34
Gambar 4. 1	Single Line Diagram kondisi semua pembangkit on....	41
Gambar 4. 2	Single Line Diagram kondisi grid dan DG 2 on	59
Gambar 4. 3	Single Line Diagram kondisi grid dan DG 1 on	76
Gambar 4. 4	Single Line Diagram kondisi grid on	93
Gambar 4. 5	Nilai dari Neuron dan MSE	110
Gambar 4. 6	Plot Performance 6 Neuron.....	111
Gambar 4. 7	Plot Training State 6 Neuron	111
Gambar 4. 8	Plot Regression State 6 Neuron	112
Gambar 4. 9	Simulasi Ketika Terjadi Gangguan pada Bus 8	114
Gambar 4. 10	Kurva TCC Rele 9 Reverse dan Rele 8 Reverse.....	114
Gambar 4. 11	Simulasi Ketika Terjadi Gangguan pada Bus 6	116
Gambar 4. 12	Kurva TCC Rele 5 Forward dan Rele 4 Forward	116
Gambar 4. 13	Simulasi Ketika Terjadi Gangguan pada Bus 5	118
Gambar 4. 14	Kurva TCC Rele 11 Reverse dan Rele 10 Reverse	118
Gambar 4. 15	Simulasi Ketika Terjadi Gangguan pada Bus 9	120
Gambar 4. 16	Kurva TCC Rele 4 Forward dan Rele 3 Forward	120

~ Halaman ini sengaja dikosongkan ~

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Koefisien Invers Time Dial	16
Tabel 2. 2	Kapasitas Distributed Generator.....	18
Tabel 2. 3	Fungsi Aktivasi.....	20
Tabel 3. 1	Data Grid	25
Tabel 3. 2	Data Distributed Generation.....	25
Tabel 3. 3	Data Beban	25
Tabel 3. 4	Data Transformator.....	25
Tabel 3. 5	Data Saluran	26
Tabel 3. 6	Data Pengaman Rele dan CT.....	26
Tabel 3. 7	Data Pasangan Rele Primer dan Rele Backup	27
Tabel 3. 8	Analisa Data Berdasarkan Jenis Kasus	31
Tabel 4.1	Arus Hubung Singkat Kondisi 1	37
Tabel 4. 2	Arus Hubung Singkat Kondisi 2.....	37
Tabel 4. 3	Arus Hubung Singkat Kondisi 3.....	37
Tabel 4. 4	Arus Hubung Singkat Kondisi 4.....	38
Tabel 4. 5	Arus setiap rele saat hubung singkat kondisi 1	38
Tabel 4. 6	Arus setiap rele saat hubung singkat kondisi 2	39
Tabel 4. 7	Arus setiap rele saat hubung singkat kondisi 3	39
Tabel 4. 8	Arus setiap rele saat hubung singkat kondisi 4	40
Tabel 4. 9	Nilai TDS dan Ipickup kondisi 1	58
Tabel 4. 10	Nilai TDS dan Ipickup kondisi 2	75
Tabel 4. 11	Nilai TDS dan Ipickup kondisi 3	92
Tabel 4. 12	Nilai TDS dan Ipickup kondisi 4	109
Tabel 4. 13	Hasil perhitungan manual dan algoritma NN kondisi 1 ...	113
Tabel 4. 14	Hasil perhitungan manual dan algoritma NN kondisi 2...	115
Tabel 4. 15	Hasil perhitungan manual dan algoritma NN kondisi 3 ...	117
Tabel 4. 16	Hasil perhitungan manual dan algoritma NN kondisi 4...	119

~ Halaman ini sengaja dikosongkan ~

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Populasi penduduk setiap tahun selalu mengalami peningkatan. Dengan adanya peningkatan populasi penduduk juga bisa dipastikan kebutuhan listrik di suatu wilayah akan meningkat. Salah satu cara untuk mengatasi adanya permasalahan tersebut yaitu menggunakan konsep pembangkit tersebar atau biasa disebut *Distributed Generation*. Pembangkit tersebar (*Distributed Generation*) adalah pembangkit-pembangkit skala kecil dengan sumber utama dan ditempatkan secara tersebar yang digabungkan dalam satu sistem. Perencanaan sistem pengaman yang baik sangat penting untuk menjaga kualitas daya listrik dalam segi stabilitas penyaluran daya listrik dan juga kontinuitas pasokan daya listrik yang dikirimkan ke konsumen. Oleh karena itu dibutuhkan selektivitas *setting* proteksi yang mampu merespon adanya gangguan dengan baik.

Pada sistem *ring* standard IEEE 9 bus yang menggunakan pembangkit listrik utama dan juga terdapat pembangkit tersebar memiliki kesulitan dan permasalahan yang lebih kompleks daripada menggunakan sistem radial. Hal ini dikarenakan sistem pengaman harus bisa menyesuaikan dengan pasokan daya dari pembangkit yang kondisinya berubah-ubah, letak gangguan yang berbeda dan juga jenis gangguan yang berbeda. Hal ini akan menyebabkan kenaikan maupun penurunan arus hubung singkat yang mengakibatkan tidak sesuai koordinasi proteksi seperti kondisi awal. Dengan menggunakan sistem *ring* salah satu kendala yang terjadi saat melakukan koordinasi proteksi yaitu menentukan waktu operasi rele primer dan rele *back-up*. Karena rele akan bekerja dalam beberapa kondisi maka *setting* rele primer dan rele *back-up* harus memperhatikan nilai CTI (*Coordination Time Interval*) berada dalam nilai *grading time* yang tepat.

Pada tugas akhir ini akan menjelaskan mengenai penggunaan rele adaptif untuk mengkoordinasikan *setting* rele secara otomatis sesuai dengan kondisi pembangkit yang berubah, letak gangguan yang berbeda dan juga jenis gangguan yang berbeda. Oleh karena itu digunakan metode *Artificial Neural Network* (ANN) yang akan memodelkan sistem yang nantinya hasil learning dari metode ANN akan dibandingkan dengan nilai *setting* secara manual.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui skema koordinasi proteksi menggunakan rele adaptif untuk mengamankan jaringan yang menggunakan sistem *ring* dalam kondisi yang berubah-ubah.
2. Menerapkan metode *Artificial Neural Network* (ANN) dalam *setting* koordinasi proteksi yang menggunakan rele adaptif pada sistem distribusi *ring*.
3. Melakukan perbandingan nilai *setting* rele secara manual dengan rele adaptif menggunakan ANN

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang akan dibahas pada Tugas Akhir ini meliputi:

1. *Setting* rele hanya digunakan untuk proteksi *short circuit* 2 fasa (L-L) dan 3 fasa (L-L-L).
2. Letak gangguan *short circuit* hanya pada bus.
3. *Setting* rele hanya *lowset* pada OCR (*over current relay*)
4. Pengambilan data arus nominal dan arus gangguan menggunakan *software* ETAP 12.6.0.
5. Simulasi *Artificial Neural Network* menggunakan *software* MATLAB R2015a.
6. *Plant* yang digunakan untuk simulasi adalah 9 bus IEEE yang telah diturunkan kapasitas tegangannya dari 150 kV menjadi 20 kV.

1.4 Tujuan

Tujuan pada tugas akhir ini adalah tercapainya koordinasi rele arus lebih yang mampu menyesuaikan kondisi yang berubah-ubah pada sistem jaringan distribusi *ring* menggunakan metode *Artificial Neural Network* sebagai metode penentuan kondisi *setting* rele.

1.5 Metodologi

Dalam mengerjakan tugas akhir ini akan dilakukan tahapan pengerjaan sebagai berikut:

1. Pengumpulan data dan studi literatur
Pengumpulan data dan studi literatur adalah bagian awal dari proses penelitian, dimana dicari literatur dari penelitian serupa yang telah dilakukan sebelumnya, lalu dilakukan kajian terhadap penelitian terdahulu untuk mengetahui bagian mana yang harus dikembangkan atau bagian mana yang bisa diadopsi pada penelitian ini. Studi literatur perlu dilakukan untuk menunjang penguasaan tentang Pengumpulan pustaka untuk dipelajari dalam pengerjaan dan penelitian Tugas Akhir (TA). Adapun data yang diperlukan dalam jaringan distribusi *ring* ini berupa *rating generator*, *rating* tegangan, *transformator*, kabel, beban dan bentuk *single line diagram*. Data-data ini bisa didapat dari jurnal ilmiah, buku, maupun *user manual*.
2. Pemodelan sistem dan simulasi
Pemodelan sistem tenaga listrik dengan menggunakan sistem distribusi *ring* 9 bus, dengan 2 unit DG, dan 1 pembangkit utama disimulasikan dengan menggunakan *software* ETAP 12.6.0. Data yang didapatkan dari hasil simulasi nantinya akan digunakan sebagai *input* yang akan dimodelkan menggunakan metode *Artificial Neural Network* untuk mendapatkan *output* dalam bentuk pengaturan koordinasi proteksi adaptif pada setiap rele arus lebih menggunakan *software* MATLAB R2015a.
3. Analisa Data
Hasil *learning* dari metode *Artificial Neural Network* nantinya akan menjadi *setting* rele yang akan dimasukkan kedalam simulasi menggunakan *software* ETAP 12.6.0 untuk memastikan kebenaran dari koordinasi proteksi tersebut. Dan dilakukan perbandingan hasil nilai secara perhitungan manual dengan menggunakan metode *Artificial Neural Network*.
4. Kesimpulan
Merupakan tahap akhir dalam penyusunan tugas akhir dengan memberikan kesimpulan dari permasalahan yang dianalisa. Selain itu juga diberikan saran dan rekomendasi agar penelitian-penelitian selanjutnya mengenai koordinasi proteksi pada sistem *ring* menghasilkan hasil yang lebih baik.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini dilakukan secara sistematis sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan , dan yang terakhir mengenai relevansi pada pengerjaan tugas akhir ini.

BAB II : DASAR TEORI

Bab ini menjelaskan tentang teori – teori penunjang yang akan digunakan pada penyusunan tugas akhir ini.

BAB III : PERANCANGAN SISTEM

Bab ini membahas tentang perancangan sistem sebelum simulasi dilakukan pada *plant* IEEE 9-Bus.

BAB IV : HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Bab ini membahas tentang hasil simulasi yang telah dilakukan pada *software* MATLAB R2015a dengan data-data yang telah diambil dari *software* ETAP 12.6.0, Analisis dilakukan terhadap kinerja koordinasi rele arah arus lebih pada sistem distribusi *ring* dengan menggunakan metode *Artificial Neural Network*.

BAB V : PENUTUP

Bab ini membahas tentang kesimpulan dan saran dari hasil studi literatur, simulasi dan analisis yang telah dilakukan pada tugas akhir ini.

1.7 Relevansi

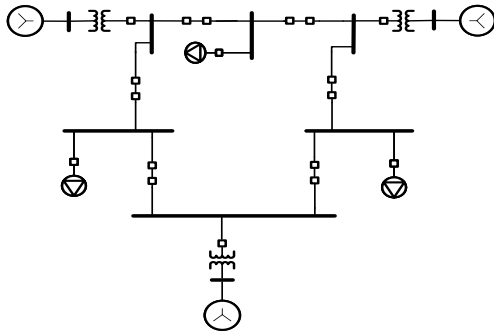
Hasil dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Sebagai referensi dan rekomendasi untuk *setting* rele arus lebih adaptif yang menggunakan sistem jaringan ring yang nantinya akan banyak digunakan dalam *smart grids*.
2. Sebagai referensi mengenai studi rele arus lebih adaptif bagi mahasiswa yang akan mengerjakan Tugas Akhir dengan permasalahan yang serupa.

BAB II DASAR TEORI

2.1 Sistem Distribusi Ring

Jaringan ini merupakan jaringan dengan bentuk konfigurasi tertutup atau biasa disebut dengan konfigurasi jaringan *loop/ring*. Jaringan ini merupakan gabungan dari jaringan dengan sistem radial. Pada jaringan dengan sistem ini memungkinkan suplai daya dari pembangkit ke beban lebih terjamin karena daya di suplai dari dua arah saluran atau lebih sehingga kontinuitas pelayanan lebih terjamin serta kualitas dayanya menjadi lebih baik.



Gambar 2. 1 Konfigurasi Ring

Keuntungan dari sistem distribusi *ring* :

1. Kualitas tegangan baik sehingga *drop* tegangan juga baik dan rugi pada saluran menjadi kecil.
2. Kontinuitas suplai daya ke beban terjamin karena dipasok dari dua arah saluran atau lebih.
3. Jika terjadi gangguan di salah satu saluran maka tidak berpengaruh pada saluran yang lain dan tetap mampu untuk meyalurkan daya listrik.

Kerugian dari sistem distribusi *ring* :

1. Biaya investasi yang mahal, baik dari segi konstruksi maupun pengembangan sistem.
2. Koordinasi proteksi lebih sulit.

2.2 Proteksi pada Sistem Tenaga Listrik

Pada sistem tenaga listrik sistem koordinasi proteksi sangat penting untuk mengatasi dan juga mengantisipasi adanya gangguan. Hal ini bertujuan untuk menjaga kontinuitas daya yang disalurkan ke beban. Selain itu untuk mengamankan peralatan agar terhindar dari kerusakan dan juga mengamankan manusia dari bahaya ketika terjadi gangguan. Salah satu peralatan penting dalam melakukan koordinasi proteksi yaitu rele pengaman. Dimana akan memberikan sinyal jika terjadi gangguan serta akan memisahkan bagian sistem yang terkena gangguan dan yang tidak terkena gangguan. Untuk menjamin keandalan, sebuah rele pengaman harus memenuhi persyaratan sebagai berikut [1]:

1. Kecepatan Bereaksi

Saat mulai ada gangguan sampai pelepasan pemutus (CB), dimana diperlukan kelambatan waktu :

$$T_{op} = t_p + t_{cb}$$

T_{op} = waktu total

t_p = waktu bereaksi dari unit proteksi

t_{cb} = waktu pelepasan CB

Kecepatan pemutus arus gangguan dapat mengurangi kerusakan serta menjaga stabilitas operasi mesin-mesin.

2. Kepekaan Operasi (*Sensitivity*)

Merupakan kemampuan rele pengaman untuk memberikan respon bila merasakan gangguan.

3. Selektif (*Selectivity*)

Kemampuan rele pengaman untuk menentukan titik dimana gangguan muncul dan memutuskan rangkaian dengan membuka CB terdekat.

4. Keandalan (*Reliability*)

Merupakan jumlah rele yang bekerja atau mengamankan terhadap jumlah gangguan yang terjadi. Keandalan rele yang baik adalah 90-99%.

5. Ekonomis

Penggunaan rele selain memenuhi syarat diatas, juga harus disesuaikan dengan harga peralatan yang diamankan.

2.3 Gangguan pada Sistem Tenaga Listrik

Gangguan pada sistem tenaga listrik merupakan kejadian pada kondisi abnormal yang mengakibatkan arus yang mengalir menjadi tidak

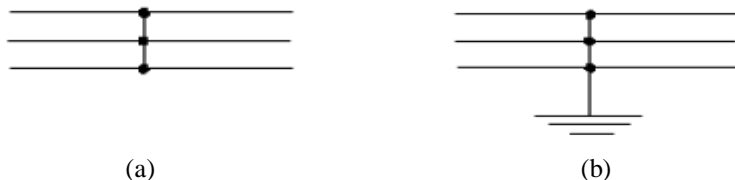
seimbang dan mengganggu aliran normal arus ke beban. Gangguan pada sistem tenaga listrik bisa terjadi dikarenakan oleh dua sumber, yaitu berasal dari *internal* sistem dan *eksternal* sistem. Gangguan yang disebabkan dari *internal* sistem sendiri yaitu adanya beban yang berlebih, kerusakan yang terjadi pada material, tegangan dan arus berada dalam kondisi yang tidak normal, serta adanya kesalahan mekanis. Sedangkan gangguan yang disebabkan dari *eksternal* sistem bisa terjadi karena faktor alam dimana hujan, angin, serta surja petir berpengaruh besar dalam terjadinya gangguan hubung singkat. Selain itu pengaruh lingkungan seperti tumbang pohon yang menyentuh saluran dan juga kelalaian manusia dalam proses instalasi juga bisa mengakibatkan adanya gangguan. Jika ditinjau dari waktu terjadinya gangguan dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu gangguan sementara/temporer dan gangguan permanen. Pada gangguan sementara/temporer, dengan memutuskan bagian yang terganggu dengan sumber tegangan sudah bisa menghilangkan gangguan dengan sendirinya. Setelah terbukanya *circuit breaker* oleh rele pengaman maka arus gangguan akan terputus dan peralatan atau saluran yang terganggu bisa dioperasikan kembali. Sedangkan pada gangguan yang bersifat permanen membutuhkan tindakan perbaikan dibagian yang rusak atau melakukan pergantian di bagian tersebut untuk menghilangkan penyebab gangguan sehingga sistem mampu dioperasikan kembali.

2.3.1 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat terjadi secara kebetulan atau disengaja antara dua titik yang mempunyai potensial berbeda yang mengakibatkan arus lebih pada fasa yang mengalami gangguan dan menyebabkan kenaikan tegangan pada bagian yang tidak mengalami gangguan. Penyebab hubung singkat bisa dibedakan menjadi dua faktor yaitu *internal* dan *eksternal*. Penyebab hubung singkat secara *internal* yaitu adanya peralatan yang rusak, saluran transmisi putus, penurunan kualitas isolasi pada generator, trafo, kabel, dan peralatan lainnya, serta kesalahan instalasi. Sedangkan penyebab hubung singkat secara *eksternal* disebabkan oleh kegagalan isolasi akibat surja petir, *overloading* peralatan akibat terjadi pemanasan, kerusakan mekanik yang disebabkan oleh kelalaian manusia.

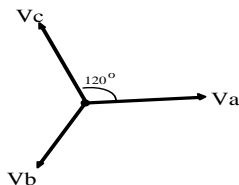
Pada gangguan hubung singkat terdapat 2 jenis gangguan, yaitu gangguan hubung singkat simetri dan gangguan hubung singkat asimetri. Gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik yaitu gangguan tidak simetri (asimetri).

2.3.1.1 Gangguan Hubung Singkat Simetri



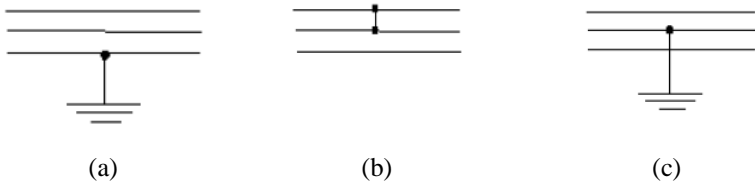
Gambar 2. 2 (a) gangguan 3 fasa (L-L-L); (b) gangguan 3 fasa ke tanah (L-L-G)

Gambar 2.2. menunjukan jenis gangguan hubung singkat simetri. Gangguan hubung singkat simetri merupakan gangguan yang terjadi pada 3 fasa atau gangguan yang seimbang antar fasanya. Pada komponen urutan positif (*positive components*) yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang sama seperti fasor aslinya. Pada komponen urutan negatif yang terdiri dari fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan fasor aslinya. Sedangkan pada komponen urutan nol yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan dengan pergeseran fasa nol antara yang satu dengan yang lain. Atau bisa disimpulkan jika terjadi gangguan, nilai pada setiap fasanya akan sama sehingga ketika dijumlahkan akan bernilai nol. Fasor diagram pada gangguan simetri dapat dilihat pada Gambar 2.3.



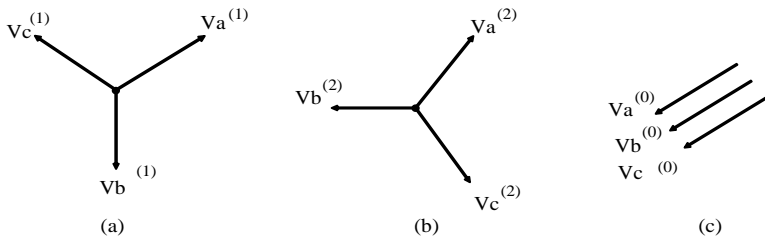
Gambar 2. 3 Fasor Diagram Gangguan Simetri

2.3.1.2 Gangguan Hubung Singkat Asimetri



Gambar 2. 4 (a) gangguan satu fasa ke tanah (1L-G); (b) gangguan antar fasa (L-L); (c) gangguan antar fasa ke tanah (2L-G)

Gambar 2.4 menunjukkan terjadinya gangguan asimetri dimana terdapat gangguan yang tidak seimbang di tiap fasanya. Pada gangguan ini arus disuplai hanya pada satu fasa atau dua fasa.



Gambar 2. 5 (a) Komponen Urutan Positif; (b) Komponen Urutan Negatif; (c) Komponen Urutan Nol

Pada Gambar 2.5 dapat dianalisa bahwa perbedaan nilai antar fasa dilihat dari besarnya magnitude ataupun dari sudut fasa. Sehingga untuk menyamakan setiap fasanya digunakanlah komponen simetri yaitu komponen urutan positif (1), komponen urutan negatif (2) dan komponen urutan nol (0). Nilai dari tegangan/arus hubung singkat adalah hasil penjumlahan dari ketiga urutan tersebut.

2.3.1.3 Perhitungan Arus Hubung Singkat [2]

Berikut akan dijelaskan mengenai perhitungan untuk menghitung besarnya arus hubung singkat.

1. Hubung singkat tiga fasa ke tanah

Pada jenis hubung singkat ini, hubung singkat melibatkan ketiga fasanya ketika terjadi gangguan. Berikut merupakan persamaan tersebut.

$$I_{sc3\Phi} = \frac{V_{LN}}{X_1} \quad (2.1)$$

Keterangan :

$I_{sc3\Phi}$: arus hubung singkat tiga fasa

V_{LN} : tegangan line to netral

X_1 : reaktansi urutan positif

2. Hubung singkat antar fasa

Merupakan hubung singkat yang terjadi antar dua fasa tanpa terhubung ke tanah. Berikut merupakan persamaan tersebut jika $X_1 = X_2$.

$$I_{sc2\Phi} = \frac{V_{LL}}{X_1 + X_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{sc3\Phi} \approx 0,86 I_{sc3\Phi}. \quad (2.2)$$

Keterangan :

$I_{sc2\Phi}$: arus hubung singkat antar fasa

V_{LL} : tegangan *line to line*

X_1 : reaktansi urutan positif

X_2 : reaktansi urutan negatif

3. Hubung singkat satu fasa ke tanah

Merupakan hubung singkat yang melibatkan impedansi urutan nol. Besar arus hubung singkat tergantung sistem pentanahan yang digunakan. Berikut merupakan persamaan tersebut.

$$I_{sc0\Phi} = \frac{3V_{LN}}{X_1 + X_2 + X_0} \quad (2.3)$$

Keterangan :

$I_{sc0\Phi}$: arus hubung singkat satu fasa ke tanah

V_{LN} : tegangan *line to netral*

X_1 : reaktansi urutan positif

X_2 : reaktansi urutan negative

X_0 : reaktansi urutan nol

4. Hubung singkat fasa ke netral

Merupakan hubung singkat yang terjadi antara salah satu fasa dengan netral. Berikut merupakan persamaan tersebut.

$$I_{sc1\Phi} = \frac{V_{L-L}/\sqrt{3}}{Z_{sc} + Z_{LN}} \quad (2.4)$$

Keterangan :

$I_{sc1\Phi}$: arus hubung singkat satu fasa ke netral

V_{L-L} : tegangan *line to line*

Z_{LN} : impedansi netral

2.3.2 Gangguan Beban Lebih

Gangguan beban lebih terjadi akibat adanya beban yang melebihi kemampuan pembangkit listrik. Hal ini dikarenakan adanya arus yang mengalir melebihi kapasitas arus nominal yang ditentukan ($I > I_n$). Sehingga arus yang mengalir melewati peralatan (trafo, generator, motor, dan peralatan listrik lainnya) akan melebihi dari kapasitas peralatan. Apabila kondisi ini berlangsung secara terus menerus akan mengakibatkan adanya panas yang berlebih pada peralatan sehingga mempercepat kerusakan peralatan dan dapat membahayakan peralatan tersebut maupun sistem.

2.3.3 Gangguan Tegangan Lebih

Gangguan tegangan lebih terjadi akibat adanya besar tegangan yang terdapat pada sistem tenaga listrik melebihi tegangan nominal seharusnya. Gangguan ini bisa disebabkan oleh kondisi berikut :

- a. Adanya surja hubung yang disebabkan oleh operasi hubung pada saluran tanpa beban, perubahan beban secara mendadak, operasi pelepasan pemutus tenaga secara mendadak, dan akibat kegagalan isolasi.
- b. Terjadinya gangguan pada pengatur tegangan otomatis / *automatic voltage regulator* (AVR) pada generator atau pada *on load tap changer transformer*.
- c. Adanya sambaran petir / surja petir yang merambat pada peralatan sehingga mengakibatkan tegangan lebih.

Keterangan :

CB	= <i>Circuit Breaker</i>
TC	= <i>Trip Coil CB</i>
I	= Arus yang mengalir pada saluran yang diamankan
CT	= Trafo arus
I _r	= Arus yang mengalir pada rele
C	= Rele arus lebih
I _p	= Arus pick-up dari rele

Current Transformer akan bekerja untuk membaca arus yang mengalir ketika kondisinya melebihi dari nilai arus nominal. Ketika *Current Transformer* mendapati adanya arus yang mengalir melebihi dari arus nominalnya maka rele akan memberi sinyal jika terjadi gangguan dan memerintahkan CB untuk beroperasi.

Koordinasi rele arus lebih terdiri dari rele utama dan rele *back up*. Kedua rele tersebut tidak boleh bekerja secara bersamaan. Jika rele utama gagal untuk mengamankan sistem maka rele *back up* akan segera beroperasi untuk menggantikannya. Berdasarkan IEEE std 242-2001 dijelaskan sebagai berikut.

Waktu terbuka CB (2-5 Cycle)	: 0,04-0,1 detik
<i>Overtravel</i> dari rele	: 0,1 detik
Faktor keamanan	: 0,12-0,22 detik

Untuk rele static dan rele digital berbasis *microprocessor*, *overtravel time* dari rele dapat diabaikan.

Sehingga total waktu	: 0,2-0,4 detik
----------------------	-----------------

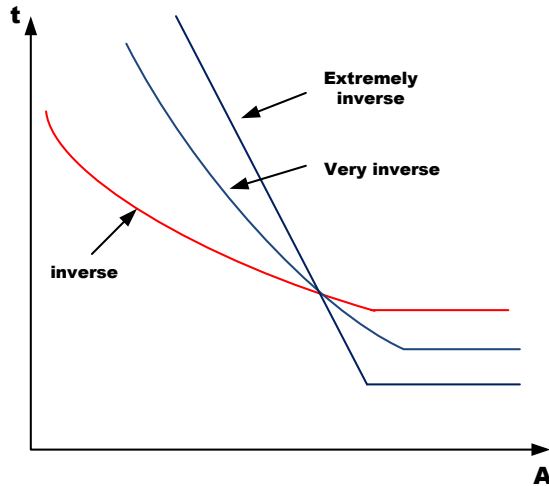
Hal ini bertujuan untuk pertimbangan dalam koordinasi antar rele sehingga rele *back up* dapat bekerja ketika rele utama gagal untuk mengamankan sistem sehingga kemungkinan terjadinya *trip* secara bersamaan dapat dihindarkan.

2.4.1.1 Rele Arus Lebih Waktu Invers

Rele arus lebih waktu invers memiliki sifat yang berbanding terbalik antara waktu operasi dengan besar arus gangguan. Semakin besar arus gangguan yang terjadi maka waktu operasi dari rele akan cepat, tetapi ketika arus gangguan yang terjadi kecil maka waktu operasi dari rele akan lebih lama. Kurva *Time Current Characteristic* (TCC) menunjukkan hubungan dari kedua parameter tersebut, dan didalam TCC terdapat *time*

dial yang akan berpengaruh terhadap lama waktu beroperasi, semakin besar nilai *time dial* maka waktu operasi akan semakin lama.

Berdasarkan standar IEC 60255-3 dan BS 142 dijelaskan bahwa perlindungan pada rele arus lebih waktu invers dibedakan menjadi 3 gradien kurva yang berbeda yaitu *standar inverse*, *very inverse*, dan , *extremely inverse*.



Gambar 2. 7 Karakteristik Kurva Invers

Gambar 2.7 menunjukkan karakteristik kurva invers dan biasa disebut dengan *Inverse Definite Minimum Time* (IDMT). Kurva tersebut menunjukkan bahwa semakin besar arus maka operasi rele akan turun mendekati waktu *definite* minimum. Persamaan IDMT dapat dituliskan sebagai berikut.

- Standart Inverse
$$\frac{0,14}{I^{0,02}-1} \times \frac{M}{10} \quad (2.5)$$

- Very Inverse
$$\frac{13,5}{I-1} \times \frac{M}{10} \quad (2.6)$$

- Extremelly Inverse
$$\frac{80}{I^2-1} \times \frac{M}{10} \quad (2.7)$$

- Long Time Inverse $\frac{120}{I-1} \times \frac{M}{10}$ (2.8)

2.4.1.2 *Penyetelan Rele Arus Lebih Waktu Invers*

Penyetelan pada rele arus lebih nilainya harus lebih besar dari arus beban. Hal ini berdasarkan prinsip bahwa batasan untuk penyetelan rele arus lebih tidak akan bekerja ketika beban maksimum. Oleh karena itu parameter yang digunakan untuk mengatur besarnya arus *pick up* yaitu pada pemilihan *tap*. Nilai *tap* dapat dihasilkan dari rumus sebagai berikut.

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT\ ratio} \quad (2.9)$$

Keterangan :

- I_{set} : arus *pick up* dalam ampere / arus yang terbaca oleh primer CT.
- $CT\ ratio$: nilai arus CT yang melewati rele pada gulungan primer CT atau gulungan sekunder CT

Pada standar British BS142 untuk mengatur nilai dari I_{set} adalah sebagai berikut.

$$1,05 I_{FLA} < I_{set} < 1,4 I_{FLA} \quad (2.10)$$

Time dial digunakan untuk mendapatkan waktu operasi dari rele. Untuk rumus penyetelan *time dial* dijelaskan sebagai berikut.

$$td = \frac{k \times TDS}{\left[\left(\frac{I_{sc\ max}}{I_{set}} \right)^\alpha - 1 \right]} \quad (2.11)$$

Keterangan :

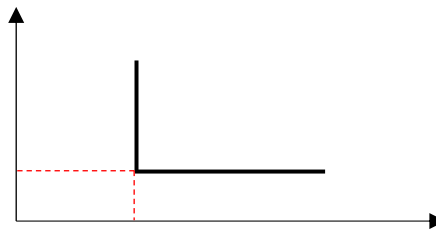
- td = Waktu operasi (detik)
- TDS = *Time dial*
- $I_{sc\ max}$ = Nilai arus gangguan (Ampere)
- I_{set} = Arus *pickup* (Ampere)
- k = Koefisien invers 1
- α = Koefisien invers 2

Tabel 2. 1 Koefisien Invers Time Dial

Tipe Kurva	Koefisien	
	k	α
<i>Standard Inverse</i>	0,14	0,02
<i>Very Inverse</i>	13,50	1,00
<i>Extremely Inverse</i>	80,00	2,00

2.4.1.3 Rele Arus Lebih Waktu Instan

Rele arus lebih waktu instan bekerja pada waktu sangat cepat yaitu kurang dari 0,08 deik, tetapi masih bisa bekerja pada waktu 0,1 detik. Kurva karakteristik rele arus lebih waktu instan bisa dilihat pada gambar 2.8 dibawah ini.



Gambar 2. 8 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Instan

Rele arus lebih waktu instan akan *trip* dalam waktu yang sama walaupun besar arus hubung singkat berbeda-beda.

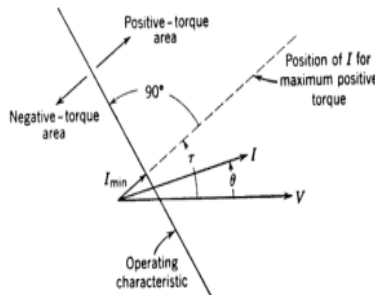
2.4.1.4 Penyetelan Rele Arus Lebih Waktu Instan

Rele arus lebih waktu instan akan bekerja ketika arus yang mengalir pada rele lebih besar dari arus yang diizinkan. Dalam menentukan arus *pick up*, arus yang digunakan yaitu arus hubung singkat minimum ($I_{sc \min}$). Sehingga rumus yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$1,6 \times I_{FLA} < I_{set} < 0,8 \times I_{sc \min} \quad (2.12)$$

2.4.2 Directional Over Current Relay (DOCR)

Rele ini memiliki kemampuan dapat bekerja pada arah yang berbeda. Dalam satu rele bisa di *setting* dalam keadaan *forward* atau *reverse*, hal ini bertujuan agar tidak terjadi kesalahan koordinasi. *Directional relay* bekerja berdasarkan pergeseran fasa antara besar polarisasi dan besar operasinya. Pada kondisi *forward*, arus tertinggal dari tegangan, sedangkan untuk kondisi *reverse* arus mendahului tegangan. Karakteristik *Directional Over Current Relay* (DOCR) dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Karakteristik Directional Over Current Relay

Directional Over Current Relay digunakan pada sistem yang mempunyai beberapa sumber pembangkit. Biasa digunakan untuk melindungi sistem dengan topologi jaringan *mesh* maupun *ring*. Dalam penggunaannya rele ini sering digabungkan dengan *over current relay* sehingga menjadi *directional over current relay* (DOCR).

2.5 Pembangkit Tersebar (Distributed Generator)

Distributed Generator adalah pembangkit listrik yang memiliki skala kecil dan terletak pada jaringan distribusi. Pada umumnya DG memiliki skala antara 1 kW – 50 MW. Tetapi pada kenyataannya pengertian DG memiliki deskripsi yang berbeda-beda. *International Council on Large Electricity System* (CIGRE) mendeskripsikan bahwa *Distributed Generation* merupakan pembangkit dengan kapasitas maksimum 50 MW sampai 100 MW, yang biasa terhubung ke jaringan

distribusi. *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, mengatakan bahwa *Distributed Generation* sebagai pembangkitan energi listrik yang dilakukan oleh peralatan yang lebih kecil dari pembangkit listrik pusat sehingga memungkinkan terjadi interkoneksi di hampir semua titik pada sistem tenaga listrik. Sedangkan *International Energy Agency (IEA)*, mendefinisikan *Distributed Generation* sebagai unit pembangkit daya listrik pada sisi konsumen dan menyuplai daya listrik langsung ke jaringan distribusi lokal [3].

Berikut merupakan kapasitas DG yang digunakan di jaringan distribusi maupun transmisi [4].

Tabel 2. 2 Kapasitas *Distributed Generator*

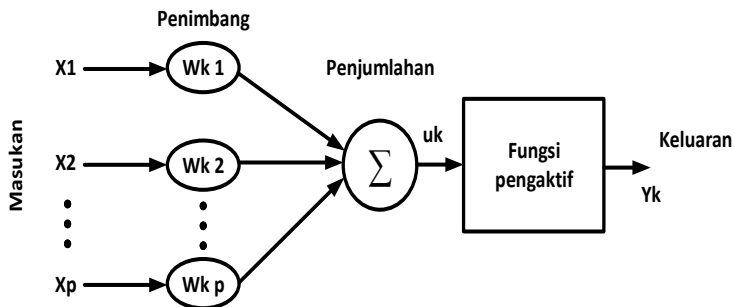
<i>Distributed Generator</i>	Kapasitas DG
Combine Cycle Gas Turbine	35 KW – 400 MW
Internal Combustion Turbine	5 KW – 10 KW
Combustion Turbine	1 MW – 250 MW
Micro Turbines (MT)	35 KW-1 MW
Small Hydro	1 – 100 MW
Micro Hydro	25 KW – 1 MW
Wind Turbine (WT)	200 W- 3MW
Photovoltaic Array (PV)	20 W- 100 KW
Solar terminal, central receiver	1 MW- 80 MW
Solar terminal, Lutz system	10 MW – 80 MW
Biomass, e.g. based in gasification	100 KW – 20 MW
Fuel cells, phosacid	200 KW – 2 MW
Fuel cells, molten carbonate	250 KW – 2 MW
Fuel cells, proton exchange	1 KW – 2 MW
Fuel cells, solid oxide	250 KW – 5 MW
Geothermal	5 – 100 MW
Ocean Energy	100 KW – 1 MW
Stirling Engine	2 – 10 KW
Battery Storage	500 KW- 5 MW

Penggunaan DG dapat membantu memenuhi kebutuhan listrik di tempat yang berada jauh dari pembangkit listrik utama sehingga kontinuitas daya ke pelanggan dan keandalan dari sistem akan semakin baik. Selain itu dengan adanya DG juga bisa mengurangi beban kerja dari pembangkit utama sehingga ketika terjadi beban puncak pembangkit

utama tetap mampu menyuplai daya dengan baik karena sebagian beban di suplai oleh DG.

2.6 Artificial Neural Network (ANN)

Artificial Neural Network (ANN) atau Jaringan Saraf Tiruan (JST) didasari pada struktur jaringan biologi, khususnya jaringan otak manusia. Pada dasarnya jaringan saraf manusia terbentuk dari satu trilyun lebih struktur dasar *neuron* yang terhubung satu sama lain oleh satu trilyun lebih sinapsis sehingga dapat melaksanakan aktifitas menyimpan pengetahuan secara teratur dan terus menerus. *Neuron* merupakan unit pemroses terkecil pada otak manusia. Oleh karena itu *Neural Network* digunakan untuk memodelkan sistem yang kompleks antara input dan output sehingga dapat ditemukan pola-pola data. Dan fungsi *neuron* pada *Neural Network* sebagai bagian terkecil dari pemrosesan. Pemodelan bentuk *neuron* bisa dilihat pada gambar 2.10 dibawah ini.



Gambar 2. 10 Model Tiruan *Neuron*

Vektor bobot “W” merupakan sarana koneksi antara dua *neuron* (berat informasi yang mengalir dari *neuron* ke *neuron* dalam jaringan saraf). Tahap awal yaitu sejumlah sinyal masukan “x” dikalikan dengan masing-masing penimbang yang bersesuaian “W”. Kemudian dilakukan penjumlahan dari seluruh hasil perkalian tersebut dan keluaran yang dihasilkan dimasukkan kedalam fungsi pengaktif untuk mendapatkan keluarannya $F(x.W)$. fungsi keluaran dari *neuron* dapat dituliskan sesuai persamaan sebagai berikut.

$$F(x, W) = f(w_1x_1 + \dots + w_nx_n) \quad (2.13)$$

Sedangkan bias yang biasa disimbolkan dengan simbol “b” memiliki arti sebagai parameter model *neuron* terpisah, yang memiliki persamaan sebagai berikut.

$$F(x, W) = f(w_1x_1 + \dots + w_nx_n) + b \quad (2.14)$$



2.6.1 Mengaktifkan Jaringan Saraf Tiruan

Pada proses ini *neuron* yang dipakai pada jaringan diaktifkan. Banyak fungsi yang bisa digunakan untuk mengaktifkan *neuron*, seperti fungsi goniometri dan hiperbolik, fungsi unit step, impuls, sigmoid, dll. Tetapi yang sering digunakan adalah fungsi sigmoid karena dianggap lebih mendekati kinerja sinyal otak manusia. Untuk lebih lanjut akan dijelaskan pada tabel berikut ini.

Tabel 2. 3 Fungsi Aktivasi

Nama	Rumus	Ikon	Fungsi Matlab
Fungsi Undak Biner (Hard Limit)	$y = \begin{cases} 0, & \text{jika } x < 0 \\ 1, & \text{jika } x \geq 0 \end{cases}$		Hardlim
Fungsi Bipolar (Symmetrical Hard Limit)	$y = \begin{cases} 1, & \text{jika } x \geq 0 \\ -1, & \text{jika } x < 0 \end{cases}$		Hardlimes
Fungsi Linear (Identitas)	$y = x$		Purelin
Fungsi Saturating Linear	$y = \begin{cases} 1, & \text{jika } x \geq 0,5 \\ x+0,5, & \text{jika } -0,5 \leq x \leq 0,5 \\ 0, & \text{jika } x \leq -0,5 \end{cases}$		Satlin
Fungsi Symetric Saturating Linear	$y = \begin{cases} 1, & \text{jika } x \geq 1 \\ x, & \text{jika } -1 \leq x \leq 1 \\ -1, & \text{jika } x \leq -1 \end{cases}$		Satlins

Tabel 2. 3 Fungsi Aktivasi (Tabel Lanjutan)

Nama	Rumus	Ikon	Fungsi Matlab
Fungsi Sigmoid Biner	$y = f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$		Logsig
Fungsi Sigmoid Bipolar	$y = f(x) = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}}$		Tansig

2.6.2 Backpropagation Neural Network

Algoritma pelatihan backpropagasi (*backpropagation*) dirumuskan oleh Werrbos tetapi dipopulerkan oleh Rumelhart dan McClelland dalam penggunaan di jaringan saraf tiruan. Pada proses pelatihan metode ini terdapat interkoneksi yang sederhana, yaitu ketika keluaran menghasilkan hasil yang salah maka *weight* akan diperbaiki sehingga nilai *error* nya semakin kecil dan hasil JST selanjutnya diharapkan menghasilkan nilai yang lebih baik. *Backpropagation* juga mampu memperbaiki *weight* pada *hidden layer*. Algoritma *backpropagation* menggunakan *error output* untuk mengubah nilai bobot-bobotnya dalam arah mundur (*backward*). Untuk mendapatkan *error* ini, tahap perambatan maju (*forward propagation*) harus dikerjakan terlebih dahulu. Pada saat perambatan maju, *neuron-neuron* diaktifkan dengan menggunakan fungsi aktivasi sebagai berikut :

- Tan Sigmoid

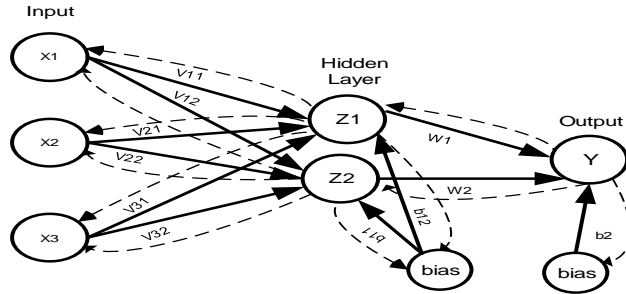
$$y = f(net) = \frac{1 - e^{-net}}{1 + e^{-net}} \quad (2.15)$$

- Log Sigmoid

$$y = f(net) = \frac{1}{1 + e^{-net}} \quad (2.16)$$

- Pure Linear

$$y = net \quad (2.17)$$



Gambar 2. 11 Arsitektur Jaringan *Backpropagation*

Gambar 2.11 menunjukam asristektur jaringan *backpropagation* yang mempunyai 3 unit *neuron input* yaitu X1, X2, X3. Mempunyai 1 lapisan *hidden layer* dengan 2 *neuron* yaitu Z1, Z2. Dan mempunyai 1 *output* yaitu Y. Pada *input* hanya terjadi pengiriman sinyal ke *hidden kayer*. Sedangkan pada *hidden layer* dan *output* terjadi proses komputasi terhadap bobot dan bias dan terjadi proses penghitungan besar *output* dari *hidden layer* dan *output layer* berdasarkan fungsi aktivasi yang dipilih.

2.6.3 Metode Levenberg-Marquadt [5]

Metode ini adalah kombinasi algoritma *Newton* dengan metode *steepest descent (gradient descent)*. Metode *gradient descent* dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut.

$$W_{kj}(t+1) = W_{kj}(t) + \alpha \cdot \delta k \cdot Z_j \quad (2.18)$$

g dan disederhanakan menjadi $W_{k+1} = W_k - \alpha g$

g adalah vektor gradient. Bentuk persamaanny adalah sebagai berikut.

$$W_{k+1} = W_k - A_k^{-1} g \quad (2.19)$$

Persamaan perbaikan penimbang metode *Levenberg-Marquardt* adalah sebagai berikut.

$$W_{k+1} = W_k - (J_k^T J_k + \mu I)^{-1} J_k^T e \quad (2.20)$$

Keterangan:

e = vektor *error* kumulatif pada keluaran untuk semua matriks

I = matriks identitas

J = matriks jacobian *error* keluaran terhadap N penimbang JST

μ = laju pelatihan

Metode ini bekerja ketika *output* dari *hidden layer* masih belum mendekati nilai *output* target dan belum memenuhi syarat *error*, maka *output learning* akan di *learning* kembali ke *hidden layer* untuk menemukan nilai bobot dan bias baru pada setiap *hidden layer* sehingga nilai *output learning* akan mendekati *output* target dan memenuhi syarat *error*nya.

~ Halaman ini sengaja dikosongkan ~

BAB III PERANCANGAN SISTEM

3.1 Sistem Kelistrikan Distribusi Ring

Sistem kelistrikan distribusi *ring* yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini yaitu menggunakan standar IEEE 9 bus. Dimana terdapat satu pembangkit utama (*grid*) dan dua pembangkit tersebar. Selain itu jenis beban yang digunakan adalah *lump load*. Sehingga akan dijelaskan *setting* rele dengan empat kondisi yang berbeda yaitu ketika *grid* dan semua DG menyala, *grid* dan DG 2 menyala, *grid* dan DG 1 menyala, dan hanya *grid* yang menyala. Adapun spesifikasi dari peralatan akan lebih dijelaskan pada tabel berikut.

Tabel 3. 1 Data *Grid*

No	Jenis	Rating Daya (MW)	Rating Tegangan (kV)	Bus
1	Grid	50	16,5	1

Tabel 3. 2 Data *Distributed Generation*

No	Jenis	Rating Daya (MW)	Rating Tegangan (kV)	Power Faktor (%)	Bus
1	DG1	5	18	85	2
2	DG2	3	13,8	85	3

Tabel 3. 3 Data Beban

No	Beban	Bus	MVA	Tegangan (kV)	Power Faktor (%)
1	Load 1	5	20	20	85
2	Load 2	6	15	20	85
3	Load 3	8	10	20	85

Tabel 3. 4 Data Transformator

No	ID Unit	MVA	Tegangan (kV)		Z(%)
			Primer	Sekunder	
1	T1	60	16,5	20	5,76
2	T2	6	18	20	6,25
3	T3	4	13,8	20	5,86

Tabel 3. 5 Data Saluran

No	Cable ID	Panjang (km)	Z saluran (Ω/km)	
			$Z_{1L} = Z_{2L}$	Z_{0L}
1	<i>Cable 1</i>	3	$0,196+j0,127$	$0,311+j0,322$
2	<i>Cable 2</i>	2	$0,196+j0,127$	$0,311+j0,322$
3	<i>Cable 3</i>	2	$0,196+j0,127$	$0,311+j0,322$
4	<i>Cable 4</i>	1	$0,196+j0,127$	$0,311+j0,322$
5	<i>Cable 5</i>	1,5	$0,196+j0,127$	$0,311+j0,322$
6	<i>Cable 6</i>	2	$0,196+j0,127$	$0,311+j0,322$

Karena terdapat empat kondisi yang berbeda maka rele yang digunakan harus mempunyai dua fungsi, oleh karena itu pada tugas akhir kali ini menggunakan rele *directional* dimana satu rele mampu bekerja dalam kondisi *forward* atau *reverse*.

Tabel 3. 6 Data Pengaman Rele dan CT

No	Id Rele	Arah Rele	Ratio CT	Bus
1	R1	<i>Forward</i>	800/5	4 – 5
2	R2	<i>Forward</i>	400/5	5 – 7
3	R3	<i>Forward</i>	400/5	7 – 8
4	R4	<i>Forward</i>	400/5	8 – 9
5	R5	<i>Forward</i>	400/5	9 – 6
6	R6	<i>Forward</i>	400/5	6 – 4
7	R7	<i>Reverse</i>	800/5	6 – 4
8	R8	<i>Reverse</i>	400/5	9 – 6
9	R9	<i>Reverse</i>	400/5	8 – 9
10	R10	<i>Reverse</i>	400/5	7 – 8
11	R11	<i>Reverse</i>	400/5	5 – 7
12	R12	<i>Reverse</i>	400/5	4 – 5
13	R13	<i>Reverse</i>	2000/5	1 – 4
14	R14	<i>Reverse</i>	150/1	3 – 9
15	R15	<i>Forward</i>	200/5	2 – 7

Pada koordinasi proteksi membutuhkan rele *primer* dan rele *backup* yang akan bekerja sesuai dengan *grading time* yang sudah ditentukan. Karena menggunakan rele *directional* maka setiap rele harus di *setting* sesuai dengan arah yang sudah ditentukan agar tidak terjadi kesalahan koordinasi proteksi, dimana arah *forward* ditentukan oleh arah koordinasi proteksi yang searah dengan jarum jam (*clock wise*) dan arah koordinasi proteksi yang berlawanan dengan arah jarum jam (*counter clock wise*) ditentukan oleh arah *reverse*. Tabel berikut menjelaskan mengenai pasangan rele *primer* dan juga rele *backup*.

Tabel 3. 7 Data Pasangan Rele Primer dan Rele Backup

No	<i>Clock wise</i>		No	<i>Counter Clock wise</i>	
	Rele Primer	Rele Backup		Rele Primer	Rele Backup
1	R1	R6	7	R7	R12
		R13			R13
2	R2	R1	8	R8	R7
3	R3	R2	9	R9	R8
		R15			R14
4	R4	R3	10	R10	R9
5	R5	R4	11	R11	R10
		R14			R15
6	R6	R5	12	R12	R11

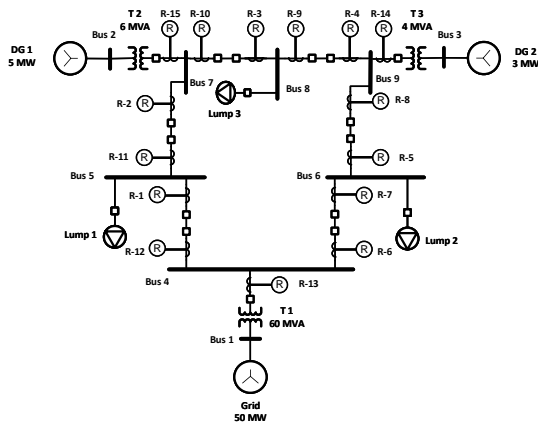
Berikut akan dijelaskan mengenai beberapa kondisi sistem kelistrikan distribusi *ring* IEEE 9 bus yang disimulasikan menggunakan *software* ETAP 12.6.0 dan *setting* rele yang digunakan pada simulasi hanya pada *setting* *lowset*. Sementara rele yang di gunakan yaitu GE Multilin F650.

3.2 Perubahan Kondisi Topologi Jaringan

Sistem yang terhubung dengan *distributed generator* akan memiliki kondisi yang berubah-ubah. Hal tersebut juga diakibatkan oleh jenis gangguan dan letak gangguan yang berubah-ubah sehingga koordinasi proteksi tentunya juga harus berubah menyesuaikan kondisi yang terjadi. Berikut merupakan Gambar 3.1, Gambar 3.2, Gambar 3.3, dan Gambar 3.4 yang akan menggambarkan sistem kelistrikan dalam berbagai kondisi.

3.2.1 Kondisi *Grid*, DG 1, dan DG 2 on (Kondisi 1)

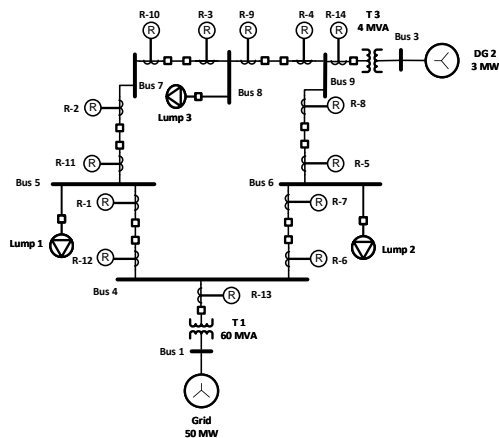
Pada kondisi ini semua pembangkit dalam keadaan menyala sehingga beban akan teraliri daya secara maksimum.



Gambar 3. 1 *Single Line Diagram* kondisi semua pembangkit on

3.2.2 Kondisi *Grid*, dan DG 2 on (Kondisi 2)

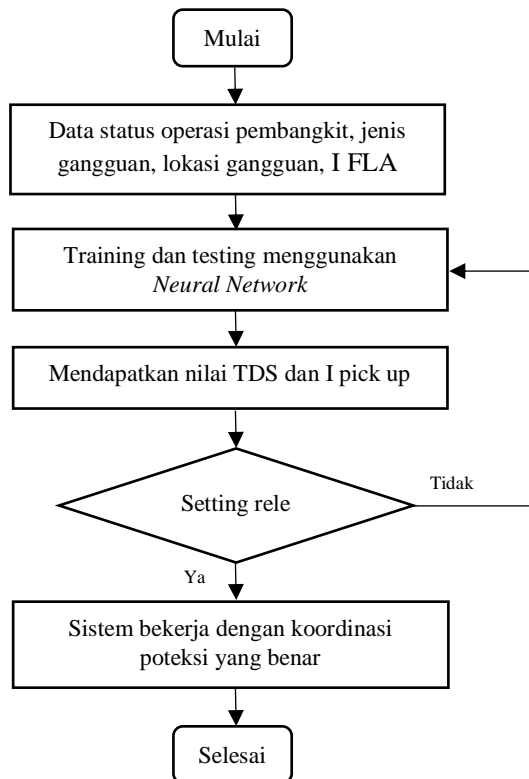
Pada kondisi ini beban hanya disuplai oleh pembangkit utama dan DG 2, sedangkan DG 1 dalam keadaan *off*.



Gambar 3. 2 *Single Line Diagram* kondisi grid dan DG 2 on

3.3 Koordinasi Proteksi Adaptif Menggunakan *Artificial Neural Network*

Dalam menggunakan *Neural Network* untuk koordinasi proteksi, dibutuhkan beberapa langkah untuk memilih *setting* rele yang akurat sehingga mampu bekerja dengan baik dalam mengamankan sistem dalam kondisi yang berubah-ubah. Gambar 3.5 dibawah ini merupakan *flowchart* penggunaan *Neural Network* pada rele arus lebih adaptif dalam jaringan distribusi *ring*.



Gambar 3. 5 *Flowchart* penggunaan algoritma *Neural Network*

Sistematika *flowchart* algoritma *Neural Network* untuk koordinasi proteksi arus lebih adaptif akan dijelaskan sebagai berikut :

1. Langkah pertama

Pada tahap awal ini dilakukan pengambilan sejumlah data seperti data status operasi pembangkit yang akan membuat topologi sistem berubah, status operasi beban, jenis gangguan yang terjadi, lokasi gangguan yang terjadi, dan tentunya nilai I FLA juga akan berbeda tergantung dari kondisi yang berubah-ubah. Langkah ini dilakukan dengan menggunakan *software* ETAP 12.6.0 yang nantinya akan diambil nilai TDS dan I *pick up*.

Tabel 3. 8 Analisa Data Berdasarkan Jenis Kasus

Case	Kondisi Sumber			Kondisi Beban			Bus	Fault
	G	DG 1	DG2	Load 1	Load 2	Load 3		
1	1	1	1	1	1	1	0	0
2	1	1	1	1	1	1	4	LL
3	1	1	1	1	1	1	4	LLL
4	1	1	1	1	1	1	5	LL
5	1	1	1	1	1	1	5	LLL
6	1	1	1	1	1	1	6	LL
7	1	1	1	1	1	1	6	LLL
8	1	1	1	1	1	1	7	LL
9	1	1	1	1	1	1	7	LLL
10	1	1	1	1	1	1	8	LL
11	1	1	1	1	1	1	8	LLL
12	1	1	1	1	1	1	9	LL
13	1	1	1	1	1	1	9	LLL
14	1	0	1	1	1	1	0	0
15	1	0	1	1	1	1	4	LL
16	1	0	1	1	1	1	4	LLL

Tabel 3. 8 Analisa Data Berdasarkan Jenis Kasus (Tabel Lanjutan).

Case	Kondisi Sumber			Kondisi Beban			Bus	Fault
	G	DG 1	DG2	Load 1	Load 2	Load 3		
17	1	0	1	1	1	1	5	LL
18	1	0	1	1	1	1	5	LLL
19	1	0	1	1	1	1	6	LL
20	1	0	1	1	1	1	6	LLL
21	1	0	1	1	1	1	7	LL
22	1	0	1	1	1	1	7	LLL
23	1	0	1	1	1	1	8	LL
24	1	0	1	1	1	1	8	LLL
25	1	0	1	1	1	1	9	LL
26	1	0	1	1	1	1	9	LLL
27	1	1	0	1	1	1	0	0
28	1	1	0	1	1	1	4	LL
29	1	1	0	1	1	1	4	LLL
30	1	1	0	1	1	1	5	LL
31	1	1	0	1	1	1	5	LLL
32	1	1	0	1	1	1	6	LL
33	1	1	0	1	1	1	6	LLL
34	1	1	0	1	1	1	7	LL
35	1	1	0	1	1	1	7	LLL
36	1	1	0	1	1	1	8	LL
37	1	1	0	1	1	1	8	LLL
38	1	1	0	1	1	1	9	LL
39	1	1	0	1	1	1	9	LLL
40	1	0	0	1	1	1	0	0

Tabel 3. 8 Analisa Data Berdasarkan Jenis Kasus (Tabel Lanjutan).

Case	Kondisi Sumber			Kondisi Beban			Bus	Fault
	G	DG 1	DG2	Load 1	Load 2	Load 3		
41	1	0	0	1	1	1	4	LL
42	1	0	0	1	1	1	4	LLL
43	1	0	0	1	1	1	5	LL
44	1	0	0	1	1	1	5	LLL
45	1	0	0	1	1	1	6	LL
46	1	0	0	1	1	1	6	LLL
47	1	0	0	1	1	1	7	LL
48	1	0	0	1	1	1	7	LLL
49	1	0	0	1	1	1	8	LL
50	1	0	0	1	1	1	8	LLL
51	1	0	0	1	1	1	9	LL
52	1	0	0	1	1	1	9	LLL

Pada tabel diatas menunjukan bahwa terdapat empat status operasi pembangkit yang berbeda dimana “1” menunjukan keadaan pembangkit *on* dan “0” menunjukan keadaan pembangkit *off*. Sedangkan beban di *setting* dalam keadaan selalu *on* di setiap kondisi pembangkitan yang berbeda. Bus yang dianalisa terletak di bus 4 sampai bus 9. Jenis gangguan yang di pilih yaitu gangguan singkat 2 fasa (L-L) dan gangguan singkat 3 fasa (L-L-L), sedangkan “0” menunjukan keadaan dimana tidak terjadi gangguan.

2. Langkah Kedua

Dalam langkah kedua ini hal yang harus dilakukan pertama kali yaitu mengklasifikasikan nilai *input* dan *output*. Data *input* yang dijadikan untuk proses dalam *Neural Network* yaitu status operasi pembangkit, status operasi beban, letak terjadinya gangguan, jenis gangguan, dan arus hubung singkat yang melewati setiap rele untuk

setiap kasus gangguan. Sedangkan data *output* yang digunakan yaitu nilai *Time Dial Setting* (TDS) dan arus *pick up*.

Pada proses *training* dan *testing* menggunakan *Neural Network* metode yang digunakan yaitu *backpropagation* yang merupakan algoritma pembelajaran yang terawasi dan digunakan oleh perceptron dengan banyak lapisan (*multi layer perceptron*) untuk mengubah bobot-bobot yang terhubung dengan *neuron-neuron* yang ada pada lapisan tersembunyinya. Algoritma *backpropagation* menggunakan *error output* untuk mengubah nilai bobot-bobotnya dalam arah mundur (*backward*). Untuk mendapatkan *error* ini, tahap perambatan maju (*forward propagation*) harus dikerjakan terlebih dahulu. Pada saat perambatan maju, *neuron-neuron* diaktifkan dengan menggunakan fungsi aktivasi sebagai berikut :

- Tan Sigmoid

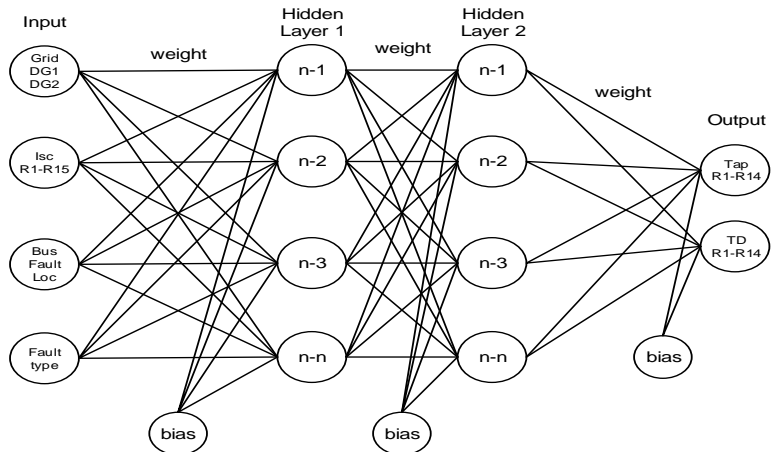
$$y = f(net) = \frac{1-e^{-net}}{1+e^{-net}} \quad (3.1)$$

- Log Sigmoid

$$y = f(net) = \frac{1}{1+e^{-net}} \quad (3.2)$$

- Pure Linear

$$y = net \quad (3.3)$$



Gambar 3. 6 Arsitektur *Neural Network*

Gambar 3.6 seperti yang ditunjukkan diatas merupakan arsitektur dari *Neural Network*. Untuk melakukan proses menggunakan *Neural Network* parameter-parameter yang digunakan sebagai berikut :

- Terdapat 2 *hidden layer* = Tansig (*hidden layer input*)
Pure Linear (*hidden layer output*)
- Jumlah *input* = 23
- Jumlah *neuron hidden layer input* = 6
- Jumlah *neuron hidden layer output* = 30
- Jumlah *output* = 30
- Target *error* = $1e-11$
- *Training Algorithm* = *Lavenberg Marquart*
- Jumlah Iterasi = 1000

Pada proses ini data pelatihan yang digunakan 70% dari data total, data validasi (15% dari data pelatihan + 15% dari data total), dan data tes (15% dari data total yang bukan data pelatihan).

3. Langkah Ketiga

Setelah proses menggunakan *Neural Network* maka akan didapatkan nilai *output* berupa nilai *Time Dial Setting* (TDS) dan arus *pick up*. Nilai tersebut akan disimulasikan menggunakan *software* ETAP 12.6.0, lalu akan dianalisa koordinasi proteksinya. Jika koordinasi proteksi masih salah maka proses akan diulang kembali dari langkah pertama.

4. Langkah Keempat

Jika nilai hasil proses menggunakan *Neural Network* sudah disimulasikan dan koordinasi proteksi yang dihasilkan sudah benar, menunjukan bahwa parameter-parameter yang digunakan sudah benar dan algoritma tersebut bisa diaplikasikan pada sistem distribusi *ring 9* bus IEEE. Pada intinya nilai TDS dan *I pick up* dari hasil perhitungan manual dengan nilai TDS dan *I pick up* dari hasil menggunakan *Neural Network* harus mempunyai nilai *error* yang kecil.

~ Halaman ini sengaja dikosongkan ~

BAB IV HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

4.1 Analisa Hubung Singkat

Pada tugas akhir ini dilakukan analisa dan pengambilan nilai arus hubung singkat dengan menggunakan *software* ETAP 12.6.0. Pada tugas akhir ini rele yang disetting hanya pada *lowset*, sehingga simulasi arus hubung singkat yang digunakan adalah *Isc max* 3 fasa ketika 0,5 *cycle*. Berikut merupakan tabel arus hubung singkat dengan berbagai kondisi.

Tabel 4.1 Arus Hubung Singkat Kondisi 1

No	ID Bus	Tegangan (kV)	Isc max (kA)
1	Bus 4	20	10,4
2	Bus 5	20	9,6
3	Bus 6	20	10
4	Bus 7	20	9,1
5	Bus 8	20	9,3
6	Bus 9	20	9,5

Tabel 4. 2 Arus Hubung Singkat Kondisi 2

No	ID Bus	Tegangan (kV)	Isc max (kA)
1	Bus 4	20	9,9
2	Bus 5	20	9,1
3	Bus 6	20	9,5
4	Bus 7	20	8,5
5	Bus 8	20	8,7
6	Bus 9	20	9

Tabel 4. 3 Arus Hubung Singkat Kondisi 3

No	ID Bus	Tegangan (kV)	Isc max (kA)
1	Bus 4	20	10,1
2	Bus 5	20	9,4
3	Bus 6	20	9,6
4	Bus 7	20	8,8
5	Bus 8	20	8,9
6	Bus 9	20	9,1

Tabel 4. 4 Arus Hubung Singkat Kondisi 4

No	ID Bus	Tegangan (kV)	Isc max (kA)
1	Bus 4	20	9,5
2	Bus 5	20	8,7
3	Bus 6	20	9,1
4	Bus 7	20	8,2
5	Bus 8	20	8,4
6	Bus 9	20	8,6

4.2 Arus Hubung Singkat Maksimum pada Rele

Arus hubung singkat merupakan nilai dari besar arus yang melewati rele ketika terjadi gangguan. Tujuan dari pengambilan data arus hubung singkat maksimal yaitu sebagai nilai untuk menghitung *setting* rele. Pengambilan data berupa arus hubung singkat maksimal (Isc max) pada rele primer dan arus hubung singkat maksimal (Isc max) pada rele *back up*. Berikut merupakan data hasil pengamatan arus hubung singkat pada setiap kondisi.

4.2.1 Arus Hubung Singkat Kondisi 1

Berikut merupakan arus kontribusi hubung singkat pada kondisi 1 dimana status operasi semua pembangkit diaktifkan.

Tabel 4. 5 Arus setiap rele saat hubung singkat kondisi 1

Bus	Rele Primer	Arah	Arus (kA)	Rele <i>backup</i>	Arah	Arus (kA)
4	Rele 6	<i>Forward</i>	3,21	Rele 5	<i>Forward</i>	1,21
	Rele 12	<i>Reverse</i>	2,5	Rele 11	<i>Reverse</i>	0,652
5	Rele 1	<i>Forward</i>	4,47	Rele 6	<i>Forward</i>	0,57
	Rele 11	<i>Reverse</i>	3,03	Rele 10	<i>Reverse</i>	2,43
6	Rele 5	<i>Forward</i>	2,9	Rele 4	<i>Forward</i>	2,51
	Rele 7	<i>Reverse</i>	4,85	Rele 12	<i>Reverse</i>	0,776
7	Rele 2	<i>Forward</i>	4,5	Rele 1	<i>Forward</i>	2,7
	Rele 10	<i>Reverse</i>	3,96	Rele 9	<i>Reverse</i>	3,03
8	Rele 3	<i>Forward</i>	3,48	Rele 2	<i>Forward</i>	2,9
	Rele 9	<i>Reverse</i>	4,72	Rele 8	<i>Reverse</i>	4,35
9	Rele 4	<i>Forward</i>	3,3	Rele 3	<i>Forward</i>	2,33
	Rele 8	<i>Reverse</i>	5,84	Rele 7	<i>Reverse</i>	3,8

4.2.2 Arus Hubung Singkat Kondisi 2

Berikut merupakan arus kontribusi hubung singkat pada kondisi 2 dimana status operasi hanya *grid* dan DG 2 diaktifkan, sedangkan DG 1 dimatikan.

Tabel 4. 6 Arus setiap rele saat hubung singkat kondisi 2

Bus	Rele Primer	Arah	Arus (kA)	Rele <i>backup</i>	Arah	Arus (kA)
4	Rele 6	<i>Forward</i>	2,99	Rele 5	<i>Forward</i>	0,984
	Rele 12	<i>Reverse</i>	2,21	Rele 11	<i>Reverse</i>	0,324
5	Rele 1	<i>Forward</i>	4,39	Rele 6	<i>Forward</i>	0,483
	Rele 11	<i>Reverse</i>	2,56	Rele 10	<i>Reverse</i>	2,56
6	Rele 5	<i>Forward</i>	2,58	Rele 4	<i>Forward</i>	2,2
	Rele 7	<i>Reverse</i>	4,67	Rele 12	<i>Reverse</i>	0,61
7	Rele 2	<i>Forward</i>	4,5	Rele 1	<i>Forward</i>	2,7
	Rele 10	<i>Reverse</i>	3,96	Rele 9	<i>Reverse</i>	3,03
8	Rele 3	<i>Forward</i>	3,02	Rele 2	<i>Forward</i>	3,02
	Rele 9	<i>Reverse</i>	4,64	Rele 8	<i>Reverse</i>	4,27
9	Rele 4	<i>Forward</i>	2,94	Rele 3	<i>Forward</i>	1,95
	Rele 8	<i>Reverse</i>	5,7	Rele 7	<i>Reverse</i>	3,67

4.2.3 Arus Hubung Singkat Kondisi 3

Berikut merupakan arus kontribusi hubung singkat pada kondisi 3 dimana status operasi hanya *grid* dan DG 1 diaktifkan, sedangkan DG 2 dimatikan.

Tabel 4. 7 Arus setiap rele saat hubung singkat kondisi 3

Bus	Rele Primer	Arah	Arus (kA)	Rele <i>backup</i>	Arah	Arus (kA)
4	Rele 6	<i>Forward</i>	2,96	Rele 5	<i>Forward</i>	0,956
	Rele 12	<i>Reverse</i>	2,42	Rele 11	<i>Reverse</i>	0,561
5	Rele 1	<i>Forward</i>	4,35	Rele 6	<i>Forward</i>	0,429
	Rele 11	<i>Reverse</i>	2,88	Rele 10	<i>Reverse</i>	2,28
6	Rele 5	<i>Forward</i>	2,55	Rele 4	<i>Forward</i>	2,55
	Rele 7	<i>Reverse</i>	4,82	Rele 12	<i>Reverse</i>	0,751
7	Rele 2	<i>Forward</i>	4,43	Rele 1	<i>Forward</i>	2,62
	Rele 10	<i>Reverse</i>	3,75	Rele 9	<i>Reverse</i>	2,82

Tabel 4. 7 Arus setiap rele saat hubung singkat kondisi 3 (Tabel Lanjutan).

Bus	Rele Primer	Arah	Arus (kA)	Rele backup	Arah	Arus (kA)
8	Rele 3	<i>Forward</i>	3,44	Rele 2	<i>Forward</i>	2,86
	Rele 9	<i>Reverse</i>	4,41	Rele 8	<i>Reverse</i>	4,41
9	Rele 4	<i>Forward</i>	3,3	Rele 3	<i>Forward</i>	2,33
	Rele 8	<i>Reverse</i>	5,84	Rele 7	<i>Reverse</i>	3,8

4.2.4 Arus Hubung Singkat Kondisi 4

Berikut merupakan arus kontribusi hubung singkat pada kondisi 4 dimana status operasi hanya *grid* yang diaktifkan, sedangkan DG 1 dan DG 2 dimatikan.

Tabel 4. 8 Arus setiap rele saat hubung singkat kondisi 4

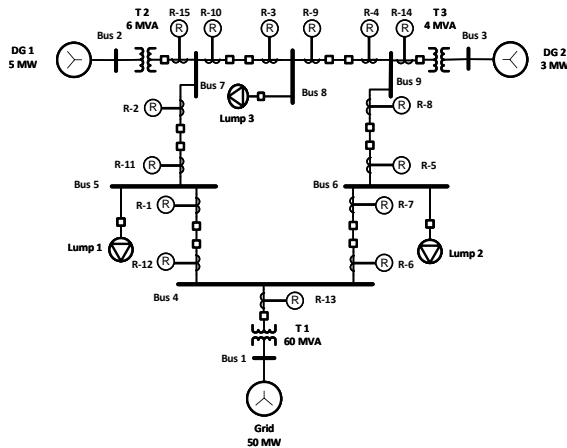
Bus	Rele Primer	Arah	Arus (kA)	Rele backup	Arah	Arus (kA)
4	Rele 6	<i>Forward</i>	2,76	Rele 5	<i>Forward</i>	0,754
	Rele 12	<i>Reverse</i>	2,07	Rele 11	<i>Reverse</i>	0,289
5	Rele 1	<i>Forward</i>	4,29	Rele 6	<i>Forward</i>	0,375
	Rele 11	<i>Reverse</i>	2,45	Rele 10	<i>Reverse</i>	2,45
6	Rele 5	<i>Forward</i>	2,26	Rele 4	<i>Forward</i>	2,26
	Rele 7	<i>Reverse</i>	4,61	Rele 12	<i>Reverse</i>	0,55
7	Rele 2	<i>Forward</i>	4,35	Rele 1	<i>Forward</i>	2,65
	Rele 10	<i>Reverse</i>	3,8	Rele 9	<i>Reverse</i>	2,79
8	Rele 3	<i>Forward</i>	2,92	Rele 2	<i>Forward</i>	2,92
	Rele 9	<i>Reverse</i>	4,3	Rele 8	<i>Reverse</i>	4,31
9	Rele 4	<i>Forward</i>	2,97	Rele 3	<i>Forward</i>	1,89
	Rele 8	<i>Reverse</i>	5,67	Rele 7	<i>Reverse</i>	3,64

4.3 Perhitungan Manual Koordinasi Proteksi Sistem Distribusi Ring

Dalam perhitungan ini yang dilakukan adalah mencari nilai *setting lowset* yang berfungsi untuk mengamankan sistem dari gangguan yang terjadi. Perhitungan ini dilakukan sampai beberapa iterasi sehingga nilai TDS yang didapatkan menjadi konvergen dan memiliki *error* yang

semakin sedikit. Dalam perhitungan kali ini nilai yang dicari yaitu nilai TDS dan *Ipickup*, dimana nilai tersebut akan menjadi *output* yang akan di proses menggunakan *neural network* dan hasilnya juga akan menjadi pembanding antara perhitungan secara manual dengan penggunaan *neural network*.

4.3.1 Kondisi *Grid on*, DG1 *on*, DG2 *on*



Gambar 4. 1 *Single Line Diagram* kondisi semua pembangkit *on*

Gambar 4.1 menunjukkan *single line diagram* kondisi semua pembangkit *on*. Pada perhitungan ini akan dilakukan koordinasi pada *clockwise relays* dan koordinasi pada *counter clockwise relays*.

□ Setting dan koordinasi pada *clockwise relays*

➤ Iterasi ke 1

Untuk langkah awal harus memilih rele mana yang akan di *setting* pertama kali. Pada perhitungan ini dipilih rele 6. Untuk nilai TDS diasumsikan nilainya berkisar dari 0,025 sampai 1,2 oleh karena itu dipilih nilai 0,03 untuk asumsi nilai TDS awal.

❖ Rele 6 (*forward*)

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
Kurva Type	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 3210 A

FLA : 286,5 A
 CT ratio : 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned}
 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\
 1,05 \times 286,5 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 286,5 \\
 300,825 &\leq I_{pp} \leq 401,1 \\
 \text{Dipilih } I_{pp} &= 300,825 \\
 \text{Tap} &= \frac{I_{pp}}{\text{CT Ratio}} = \frac{300,825}{400/5} = 3,76
 \end{aligned}$$

- **Time Dial Setting**

Asumsi nilai $\text{TDS}_{(1)} = 0,03$

$$\begin{aligned}
 \text{top } R_{6(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 &= \frac{0,14 \times 0,03}{\left[\left(\frac{3210}{300,825} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 &= 0,087
 \end{aligned}$$

- ❖ **Rele 5 (forward)**

Manufacturer : GE Multilin
 Model : F650
Kurva Type : IEC – Curva A
 Isc max utama : 2900 A
 Isc max *backup* : 1210 A
 FLA : 300 A
 CT ratio : 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned}
 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\
 1,05 \times 300 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 300 \\
 315 &\leq I_{pp} \leq 420 \\
 \text{Dipilih } I_{pp} &= 315 \\
 \text{Tap} &= \frac{I_{pp}}{\text{CT Ratio}} = \frac{315}{400/5} = 3,938
 \end{aligned}$$

- **Time Dial Setting**

$$t R5_{(1)} = 0,087 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ = 0,307 \text{ s}$$

$$t R5_{(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,307 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{1210}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,060$$

- **Waktu Operasi**

$$\text{top } R5_{(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= \frac{0,14 \times 0,060}{\left[\left(\frac{2900}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= 0,184 \text{ s}$$

- ❖ **Rele 4 (forward)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 3300 A
Isc max <i>backup</i>	: 2510 A
FLA	: 300 A
CT ratio	: 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned} 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\ 1,05 \times 300 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 300 \\ 315 &\leq I_{pp} \leq 420 \\ \text{Dipilih } I_{pp} &= 315 \end{aligned}$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{315}{400 / 5} = 3,938$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned} t R4_{(1)} &= 0,184 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ &= 0,404 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t R4_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ 0,404 &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{2330}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,122$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R4_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,122}{\left[\left(\frac{3300}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= 0,356 \text{ s} \end{aligned}$$

- ❖ **Rele 3 (forward)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 3480 A
Isc max <i>backup</i>	: 2330 A
FLA	: 300 A
CT ratio	: 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned} 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\ 1,05 \times 300 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 300 \\ 315 &\leq I_{pp} \leq 420 \\ \text{Dipilih } I_{pp} &= 315 \end{aligned}$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{315}{400 / 5} = 3,938$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned} t_{R3(1)} &= 0,356 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ &= 0,576 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{R3(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ 0,576 &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{2330}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,168$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R3(1) &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,168}{\left[\left(\frac{3480}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= 0,478 \text{ s} \end{aligned}$$

- ❖ **Rele 2 (forward)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 4500 A
Isc max <i>backup</i>	: 2900 A
FLA	: 300 A
CT ratio	: 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned} 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\ 1,05 \times 300 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 300 \\ 315 &\leq I_{pp} \leq 420 \\ \text{Dipilih } I_{pp} &= 315 \end{aligned}$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{315}{400 / 5} = 3,938$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned} t R2_{(1)} &= 0,478 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ &= 0,698 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t R2_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ 0,698 &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{2900}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,226$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R2_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,226}{\left[\left(\frac{4500}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= 0,58 \text{ s} \end{aligned}$$

- ❖ **Rele 1 (forward)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 4470 A
Isc max <i>backup</i>	: 2700 A
FLA	: 621,6 A
CT ratio	: 800/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned} 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\ 1,05 \times 621,6 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 621,6 \\ 652,68 &\leq I_{pp} \leq 870,24 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Dipilih } I_{pp} &= 652,68 \\ \text{Tap} &= \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{652,68}{800/5} = 4,079 \end{aligned}$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned} t R_{1(1)} &= 0,58 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ &= 0,8 \text{ s} \\ t R_{1(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ 0,8 &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{2700}{652,68} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,165$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R_{1(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,164}{\left[\left(\frac{4470}{652,68} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= 0,587 \text{ s} \end{aligned}$$

- ❖ **Rele 6 (forward)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
Kurva Type	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 3210 A
Isc max backup	: 570 A
FLA	: 286,5 A
CT ratio	: 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned} 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\ 1,05 \times 286,5 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 286,5 \\ 300,825 &\leq I_{pp} \leq 401,1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Dipilih } I_{pp} &= 300,825 \\ \text{Tap} &= \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{300,825}{400 / 5} = 3,76\end{aligned}$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned}t R_{6(1)} &= 0,587 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ &= 0,807 \text{ s}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}t R_{6(1)} &= \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ 0,807 &= \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{570}{300,825} \right)^{0,02} - 1 \right]}\end{aligned}$$

$$TDS_{(1)} = 0,074$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned}\text{top } R_{6(1)} &= \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,074}{\left[\left(\frac{3210}{300,825} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= 0,214 \text{ s}\end{aligned}$$

Iterasi dilakukan terus menerus sampai nilai $TDS_{(n)} = TDS_{(n-1)}$ sehingga didapatkan hasil nilai *error* dari nilai TDS setiap rele mendekati nol.

□ **Setting dan koordinasi pada counter clockwise relays**

➤ **Iterasi ke 1**

Untuk langkah awal harus memilih rele mana yang akan di *setting* pertama kali. Pada perhitungan ini dipilih rele 11. Untuk nilai TDS diasumsikan nilainya berkisar dari 0,025 sampai 1,2 oleh karena itu dipilih nilai 0,03 untuk asumsi nilai TDS awal.

❖ **Rele 11 (reverse)**

Manufacturer : GE Multilin
Model : F650

<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 3030 A
FLA	: 300 A
CT ratio	: 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned}
 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\
 1,05 \times 300 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 300 \\
 315 &\leq I_{pp} \leq 420 \\
 \text{Dipilih } I_{pp} &= 315 \\
 \text{Tap} &= \frac{I_{pp}}{\text{CT Ratio}} = \frac{315}{400/5} = 3,938
 \end{aligned}$$

- **Time Dial Setting**

Asumsi nilai $\text{TDS}_{(1)} = 0,03$

$$\begin{aligned}
 \text{top R11}_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 &= \frac{0,14 \times 0,03}{\left[\left(\frac{3030}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 &= 0,091
 \end{aligned}$$

- ❖ **Rele 10 (reverse)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 3960 A
Isc max <i>backup</i>	: 2430 A
FLA	: 300 A
CT ratio	: 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned}
 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\
 1,05 \times 300 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 300 \\
 315 &\leq I_{pp} \leq 420 \\
 \text{Dipilih } I_{pp} &= 315
 \end{aligned}$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{315}{400 / 5} = 3,938$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned} t R10_{(1)} &= 0,091 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ &= 0,311 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t R10_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ 0,311 &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{2430}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,093$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R10_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,093}{\left[\left(\frac{3960}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= 0,250 \text{ s} \end{aligned}$$

- ❖ **Rele 9 (reverse)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 4720 A
Isc max <i>backup</i>	: 3030 A
FLA	: 300 A
CT ratio	: 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned} 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\ 1,05 \times 300 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 300 \\ 315 &\leq I_{pp} \leq 420 \\ \text{Dipilih } I_{pp} &= 315 \end{aligned}$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{315}{400 / 5} = 3,938$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned} t R9_{(1)} &= 0,250 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ &= 0,470 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t R9_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ 0,470 &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{3030}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,155$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R9_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,155}{\left[\left(\frac{4720}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= 0,391 \text{ s} \end{aligned}$$

- ❖ **Rele 8 (reverse)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
Kurva Type	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 5840 A
Isc max backup	: 4350 A
FLA	: 300 A
CT ratio	: 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned} 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\ 1,05 \times 300 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 300 \\ 315 &\leq I_{pp} \leq 420 \end{aligned}$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 315$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{315}{400 / 5} = 3,938$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned} t_{R8(1)} &= 0,391 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ &= 0,611 \text{ s} \end{aligned}$$

$$t_{R8(1)} = \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,611 = \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{4350}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$TDS_{(1)} = 0,235$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R8_{(1)} &= \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,235}{\left[\left(\frac{5840}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$= 0,548 \text{ s}$$

- ❖ **Rele 7 (reverse)**

Manufacturer : GE Multilin

Model : F650

Kurva Type : IEC – Curva A

Isc max utama : 4850 A

Isc max *backup* : 3800 A

FLA : 690,8 A

CT ratio : 800/5

- **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times FLA \leq I_{pp} \leq 1,4 \times FLA$$

$$1,05 \times 690,5 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 690,5$$

$$725,025 \leq I_{pp} \leq 967,7$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 725,025$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{725,025}{400/5} = 4,531$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned} t R7_{(1)} &= 0,548 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ &= 0,768 \text{ s} \end{aligned}$$

$$t R7_{(1)} = \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,768 = \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{3800}{725,025} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$TDS_{(1)} = 0,185$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R7_{(1)} &= \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,185}{\left[\left(\frac{4850}{725,025} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$= 0,667 \text{ s}$$

- ❖ **Rele 12 (reverse)**

Manufacturer : GE Multilin

Model : F650

Kurva Type : IEC – Curva A

Isc max utama : 2500 A

Isc max *backup* : 776 A

FLA : 300 A

CT ratio : 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times FLA \leq I_{pp} \leq 1,4 \times FLA$$

$$1,05 \times 300 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 300$$

$$315 \leq I_{pp} \leq 420$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 315$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{315}{400/5} = 3,938$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned} t_{R12(1)} &= 0,667 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ &= 0,887 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{R12(1)} &= \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ 0,887 &= \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{776}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$TDS_{(1)} = 0,115$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R12_{(1)} &= \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,115}{\left[\left(\frac{2500}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= 0,382 \text{ s} \end{aligned}$$

- ❖ **Rele 11 (reverse)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 3030 A
Isc max <i>backup</i>	: 652 A
FLA	: 300 A
CT ratio	: 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned} 1,05 \times FLA &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times FLA \\ 1,05 \times 300 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 300 \\ 315 &\leq I_{pp} \leq 420 \end{aligned}$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 315$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{315}{400 / 5} = 3,938$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned} t_{R11(1)} &= 0,382 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ &= 0,602 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{R11(1)} &= \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ 0,602 &= \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{652}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$TDS_{(1)} = 0,063$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R11_{(1)} &= \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,063}{\left[\left(\frac{3030}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= 0,190 \text{ s} \end{aligned}$$

Iterasi dilakukan terus menerus sampai nilai $TDS_{(n)} = TDS_{(n-1)}$ sehingga didapatkan hasil nilai *error* dari nilai TDS setiap rele mendekati nol.

Perhitungan dengan menggunakan iterasi hanya digunakan pada rele yang berada dalam sistem *ring*. Oleh karena itu rele 13, rele 14, dan rele 15 yang letaknya berada diluar sistem *ring* dan berfungsi untuk melindungi pembangkit menggunakan perhitungan manual tanpa adanya iterasi.

- ❖ **Rele 13 (reverse)**

Manufacturer : GE Multilin

Model : F650

Kurva Type : IEC – Curva A

Isc max <i>backup</i>	: 4190 A
FLA	: 1732 A
CT ratio	: 2000/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned}
 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\
 1,05 \times 1732 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 1732 \\
 1818,6 &\leq I_{pp} \leq 2424,8 \\
 \text{Dipilih } I_{pp} &= 1905,2 \\
 \text{Tap} &= \frac{I_{pp}}{\text{CT Ratio}} = \frac{1905,2}{2000/5} = 4,763
 \end{aligned}$$

- **Time Dial Setting**

Rele 13 merupakan rele *backup* dari rele 7 dan rele 1. Rele 7 mempunyai waktu operasi 0,723 s, sedangkan rele 1 mempunyai waktu operasi 0,624 s. Karena rele 13 menjadi *backup* paling akhir maka dipilih waktu operasi rele 7 yang bernilai lebih besar.

$$\begin{aligned}
 t_{R13} &= 0,723 \text{ s} + 0,2 \text{ s} \\
 &= 0,923 \text{ s} \\
 t_{R13} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 0,923 &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{4190}{1905,2} \right)^{0,02} - 1 \right]}
 \end{aligned}$$

$$\text{TDS} = 0,105$$

- ❖ **Rele 14 (reverse)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
Kurva Type	: IEC – Curva A
Isc max <i>backup</i>	: 377 A
FLA	: 115,5 A
CT ratio	: 150/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned}
 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\
 1,05 \times 115,5 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 115,5
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 121,275 &\leq I_{pp} \leq 161,7 \\
 \text{Dipilih } I_{pp} &= 138,6 \\
 \text{Tap} &= \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{138,6}{150/5} = 4,620
 \end{aligned}$$

- **Time Dial Setting**

Rele 14 merupakan rele *backup* dari rele 5 dan rele 9. Rele 5 mempunyai waktu operasi 0,267 s, sedangkan rele 9 mempunyai waktu operasi 0,463 s. Karena rele 14 menjadi *backup* paling akhir maka dipilih waktu operasi rele 9 yang bernilai lebih besar.

$$\begin{aligned}
 t_{R14} &= 0,463 \text{ s} + 0,2 \text{ s} \\
 &= 0,663 \text{ s} \\
 t_{R14} &= \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 0,663 &= \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{377}{138,6} \right)^{0,02} - 1 \right]}
 \end{aligned}$$

$$TDS = 0,096$$

- ❖ **Rele 15 (forward)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
Kurva Type	: IEC – Curva A
Isc max <i>backup</i>	: 603 A
FLA	: 173,2 A
CT ratio	: 200/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned}
 1,05 \times FLA &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times FLA \\
 1,05 \times 173,2 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 173,2 \\
 181,86 &\leq I_{pp} \leq 242,48 \\
 \text{Dipilih } I_{pp} &= 190,52 \\
 \text{Tap} &= \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{190,52}{200/5} = 4,763
 \end{aligned}$$

- **Time Dial Setting**

Rele 15 merupakan rele *backup* dari rele 3 dan rele 11. Rele 3 mempunyai waktu operasi 0,538 s, sedangkan rele 11 mempunyai waktu operasi 0,198 s. Karena rele 15 menjadi *backup* paling akhir maka dipilih waktu operasi rele 3 yang bernilai lebih besar.

$$\begin{aligned}
 t_{R15} &= 0,538 \text{ s} + 0,2 \text{ s} \\
 &= 0,738 \text{ s} \\
 t_{R15} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 0,738 &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{603}{190,52} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 \text{TDS} &= 0,123
 \end{aligned}$$

Perhitungan diatas merupakan nilai acuan yang akan digunakan dalam *software* ETAP 12.6.0. Untuk rele berbasis *microprocessor*, *Overtravel time* dari rele adalah 0,2 s - 0,4 s. Sehingga pada kurva TCC nilai TDS maupun *Ipick up* bisa digeser secara manual agar jarak waktu operasi dari rele utama dan rele *backup* bernilai 0,2 s - 0,4 s.

Tabel 4. 9 Nilai TDS dan *Ipickup* kondisi 1

Rele	TDS Manual	<i>Ipick up</i>
R1	0,174	4,079
R2	0,244	3,938
R3	0,190	3,938
R4	0,150	3,938
R5	0,090	3,938
R6	0,080	3,760
R7	0,200	4,531
R8	0,263	3,938
R9	0,184	3,938
R10	0,125	3,938
R11	0,070	3,938
R12	0,130	3,938

<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 2990 A
FLA	: 200 A
CT ratio	: 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned}
 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\
 1,05 \times 200 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 200 \\
 210 &\leq I_{pp} \leq 280 \\
 \text{Dipilih } I_{pp} &= 210 \\
 \text{Tap} &= \frac{I_{pp}}{\text{CT Ratio}} = \frac{210}{400 / 5} = 2,625
 \end{aligned}$$

- **Time Dial Setting**

Asumsi nilai $\text{TDS}_{(1)} = 0,03$

$$\begin{aligned}
 \text{top } R_{6(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 &= \frac{0,14 \times 0,03}{\left[\left(\frac{2990}{210} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 &= 0,077
 \end{aligned}$$

- ❖ **Rele 5 (forward)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 2580 A
Isc max <i>backup</i>	: 984 A
FLA	: 200 A
CT ratio	: 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned}
 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\
 1,05 \times 200 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 200 \\
 210 &\leq I_{pp} \leq 280 \\
 \text{Dipilih } I_{pp} &= 210
 \end{aligned}$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{210}{400 / 5} = 2,625$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned} t R5_{(1)} &= 0,077 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ &= 0,297 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t R5_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ 0,297 &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{984}{210} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,067$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R5_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,067}{\left[\left(\frac{2580}{210} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= 0,181 \text{ s} \end{aligned}$$

- ❖ **Rele 4 (forward)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 2940 A
Isc max <i>backup</i>	: 2200 A
FLA	: 200 A
CT ratio	: 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned} 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\ 1,05 \times 200 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 200 \\ 210 &\leq I_{pp} \leq 280 \\ \text{Dipilih } I_{pp} &= 210 \end{aligned}$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{210}{400 / 5} = 2,625$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned} t R_{4(1)} &= 0,181 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ &= 0,401 \text{ s} \end{aligned}$$

$$t R_{4(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,401 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{2200}{210} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,138$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R_{4(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,138}{\left[\left(\frac{2940}{210} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$= 0,356 \text{ s}$$

- ❖ **Rele 3 (forward)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 3020 A
Isc max <i>backup</i>	: 1950 A
FLA	: 200 A
CT ratio	: 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned} 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\ 1,05 \times 200 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 200 \\ 210 &\leq I_{pp} \leq 280 \end{aligned}$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 210$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{210}{400 / 5} = 2,625$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned} t_{R3(1)} &= 0,356 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ &= 0,576 \text{ s} \end{aligned}$$

$$t_{R3(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,576 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{1950}{210} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,188$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R3(1) &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,188}{\left[\left(\frac{3020}{210} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$= 0,479 \text{ s}$$

- ❖ **Rele 2 (forward)**

Manufacturer : GE Multilin

Model : F650

Kurva Type : IEC – Curva A

Isc max utama : 4500 A

Isc max *backup* : 3020 A

FLA : 200 A

CT ratio : 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 200 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 200$$

$$210 \leq I_{pp} \leq 280$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 210$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{210}{400 / 5} = 2,625$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned} t R2_{(1)} &= 0,479 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ &= 0,699 \text{ s} \end{aligned}$$

$$t R2_{(1)} = \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,699 = \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{3020}{210} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$TDS_{(1)} = 0,274$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R2_{(1)} &= \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,274}{\left[\left(\frac{4500}{210} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$= 0,606 \text{ s}$$

- ❖ **Rele 1 (forward)**

Manufacturer : GE Multilin

Model : F650

Kurva Type : IEC – Curva A

Isc max utama : 4390 A

Isc max *backup* : 2700 A

FLA : 621,6 A

CT ratio : 800/5

- **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times FLA \leq I_{pp} \leq 1,4 \times FLA$$

$$1,05 \times 621,6 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 621,6$$

$$653,68 \leq I_{pp} \leq 870,24$$

$$\begin{aligned}\text{Dipilih } I_{pp} &= 653,68 \\ \text{Tap} &= \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{653,68}{800/5} = 4,079\end{aligned}$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned}t R1_{(1)} &= 0,606 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ &= 0,826 \text{ s}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}t R1_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ 0,826 &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{2700}{653,68} \right)^{0,02} - 1 \right]}\end{aligned}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,170$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned}\text{top } R1_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,170}{\left[\left(\frac{4390}{653,68} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= 0,612 \text{ s}\end{aligned}$$

- ❖ **Rele 6 (forward)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
Kurva Type	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 2990 A
Isc max backup	: 483 A
FLA	: 200 A
CT ratio	: 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned}1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\ 1,05 \times 200 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 200 \\ 210 &\leq I_{pp} \leq 280\end{aligned}$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 210$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{210}{400 / 5} = 2,625$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned} t R6_{(1)} &= 0,612 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ &= 0,832 \text{ s} \end{aligned}$$

$$t R6_{(1)} = \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,1 = \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{483}{200} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$TDS_{(1)} = 0,1$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R6_{(1)} &= \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,1}{\left[\left(\frac{2990}{200} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$= 0,256 \text{ s}$$

Iterasi dilakukan terus menerus sampai nilai $TDS_{(n)} = TDS_{(n-1)}$ sehingga didapatkan hasil nilai *error* dari nilai TDS setiap rele mendekati nol.

□ **Setting dan koordinasi pada counter clockwise relays**

➤ **Iterasi ke 1**

Untuk langkah awal harus memilih rele mana yang akan di *setting* pertama kali. Pada perhitungan ini dipilih rele 11. Untuk nilai TDS diasumsikan nilainya berkisar dari 0,025 sampai 1,2 oleh karena itu dipilih nilai 0,03 untuk asumsi nilai TDS awal.

❖ **Rele 11 (reverse)**

Manufacturer : GE Multilin

Model : F650

<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 2560 A
FLA	: 200 A
CT ratio	: 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned}
 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\
 1,05 \times 200 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 200 \\
 210 &\leq I_{pp} \leq 280 \\
 \text{Dipilih } I_{pp} &= 210 \\
 \text{Tap} &= \frac{I_{pp}}{\text{CT Ratio}} = \frac{210}{400/5} = 2,625
 \end{aligned}$$

- **Time Dial Setting**

Asumsi nilai $\text{TDS}_{(1)} = 0,03$

$$\begin{aligned}
 \text{top R11}_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{\text{sc max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 &= \frac{0,14 \times 0,03}{\left[\left(\frac{2560}{210} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 &= 0,082
 \end{aligned}$$

- ❖ **Rele 10 (reverse)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 3960 A
Isc max <i>backup</i>	: 2560 A
FLA	: 200 A
CT ratio	: 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned}
 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\
 1,05 \times 200 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 200 \\
 210 &\leq I_{pp} \leq 280 \\
 \text{Dipilih } I_{pp} &= 210
 \end{aligned}$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{210}{400 / 5} = 2,625$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned} t R10_{(1)} &= 0,082 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ &= 0,302 \text{ s} \end{aligned}$$

$$t R10_{(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,302 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{2560}{210} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,111$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R10_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,111}{\left[\left(\frac{3960}{210} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$= 0,256 \text{ s}$$

- ❖ **Rele 9 (reverse)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 4640 A
Isc max <i>backup</i>	: 3030 A
FLA	: 282,3 A
CT ratio	: 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned} 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\ 1,05 \times 282,3 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 282,3 \\ 296,415 &\leq I_{pp} \leq 396,86 \\ \text{Dipilih } I_{pp} &= 296,415 \end{aligned}$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{296,415}{400/5} = 3,705$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned} t R9_{(1)} &= 0,256 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ &= 0,476 \text{ s} \end{aligned}$$

$$t R9_{(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,476 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{3030}{296,415} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,162$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R9_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,162}{\left[\left(\frac{4640}{296,415} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= 0,4 \text{ s} \end{aligned}$$

- ❖ **Rele 8 (reverse)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 5700 A
Isc max <i>backup</i>	: 4270 A
FLA	: 254,6 A
CT ratio	: 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned} 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\ 1,05 \times 254,6 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 254,6 \\ 267,33 &\leq I_{pp} \leq 356,44 \\ \text{Dipilih } I_{pp} &= 267,33 \end{aligned}$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{267,33}{400 / 5} = 3,342$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned} t R8_{(1)} &= 0,4 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ &= 0,62 \text{ s} \end{aligned}$$

$$t R8_{(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,62 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{4270}{267,33} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,253$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R8_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,252}{\left[\left(\frac{5700}{267,33} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= 0,560 \text{ s} \end{aligned}$$

- ❖ **Rele 7 (reverse)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 4670 A
Isc max <i>backup</i>	: 3670 A
FLA	: 690,5 A
CT ratio	: 800/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned} 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\ 1,05 \times 690,5 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 690,5 \\ 725,025 &\leq I_{pp} \leq 966,7 \\ \text{Dipilih } I_{pp} &= 725,025 \end{aligned}$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{725,025}{400 / 5} = 4,531$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned} t R7_{(1)} &= 0,560 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ &= 0,780 \text{ s} \end{aligned}$$

$$t R7_{(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,780 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{3670}{725,025} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,184$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R7_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,184}{\left[\left(\frac{4670}{725,025} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= 0,678 \text{ s} \end{aligned}$$

- ❖ **Rele 12 (reverse)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 2210 A
Isc max <i>backup</i>	: 610 A
FLA	: 200 A
CT ratio	: 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned} 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\ 1,05 \times 200 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 200 \\ 210 &\leq I_{pp} \leq 280 \\ \text{Dipilih } I_{pp} &= 210 \end{aligned}$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{210}{400/5} = 2,625$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned} t R12_{(1)} &= 0,678 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ &= 0,898 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t R12_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ 0,898 &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{610}{210} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,138$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R12_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,138}{\left[\left(\frac{2210}{210} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= 0,401 \text{ s} \end{aligned}$$

- ❖ **Rele 11 (reverse)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 2560 A
Isc max <i>backup</i>	: 324 A
FLA	: 300 A
CT ratio	: 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned} 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\ 1,05 \times 200 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 200 \\ 210 &\leq I_{pp} \leq 280 \\ \text{Dipilih } I_{pp} &= 210 \end{aligned}$$

$$Tap = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{210}{400/5} = 2,625$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned} t_{R11(1)} &= 0,401 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\ &= 0,621 \text{ s} \end{aligned}$$

$$t_{R11(1)} = \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,621 = \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{324}{210} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$TDS_{(1)} = 0,039$$

- **Waktu Operasi**

$$top_{R11(1)} = \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= \frac{0,14 \times 0,039}{\left[\left(\frac{2560}{210} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= 0,106 \text{ s}$$

Iterasi dilakukan terus menerus sampai nilai $TDS_{(n)} = TDS_{(n-1)}$ sehingga didapatkan hasil nilai *error* dari nilai TDS setiap rele mendekati nol.

Perhitungan dengan menggunakan iterasi hanya digunakan pada rele yang berada dalam sistem *ring*. Oleh karena itu rele 13, dan rele 14, yang letaknya berada diluar sistem *ring* dan berfungsi untuk melindungi pembangkit menggunakan perhitungan manual tanpa adanya iterasi.

- ❖ **Rele 13 (reverse)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
Kurva Type	: IEC – Curva A
Isc max backup	: 4210 A
FLA	: 1732 A
CT ratio	: 2000/5

- **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 1732 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 1732$$

$$1818,6 \leq I_{pp} \leq 2424,8$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 1905,2$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{1905,2}{2000/5} = 4,763$$

- **Time Dial Setting**

Rele 13 merupakan rele *backup* dari rele 7 dan rele 1. Rele 7 mempunyai waktu operasi 0,691 s, sedangkan rele 1 mempunyai waktu operasi 0,669 s. Karena rele 13 menjadi *backup* paling akhir maka dipilih waktu operasi rele 7 yang bernilai lebih besar.

$$t_{R13} = 0,691 \text{ s} + 0,2 \text{ s}$$

$$= 0,891 \text{ s}$$

$$t_{R13} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,891 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{4210}{1905,2} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS} = 0,102$$

- ❖ **Rele 14 (reverse)**

Manufacturer : GE Multilin

Model : F650

Kurva Type : IEC – Curva A

Isc max *backup* : 377 A

FLA : 115,5 A

CT ratio : 150/5

- **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 115,5 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 115,5$$

$$121,275 \leq I_{pp} \leq 161,7$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 138,6$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{138,6}{150/5} = 4,620$$

- **Time Dial Setting**

Rele 14 merupakan rele *backup* dari rele 5 dan rele 9. Rele 5 mempunyai waktu operasi 0,301 s, sedangkan rele 9 mempunyai waktu operasi 0,418 s. Karena rele 14 menjadi *backup* paling akhir maka dipilih waktu operasi rele 9 yang bernilai lebih besar.

$$\begin{aligned} t_{R14} &= 0,418 \text{ s} + 0,2 \text{ s} \\ &= 0,618 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{R14} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ 0,618 &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{377}{138,6} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$\text{TDS} = 0,089$$

Perhitungan diatas merupakan nilai acuan yang akan digunakan dalam *software* ETAP 12.6.0. Untuk rele berbasis *microprocessor*, *Overtravel time* dari rele adalah 0,2 s - 0,4 s. Sehingga pada kurva TCC nilai TDS maupun *Ipick up* bisa digeser secara manual agar jarak waktu operasi dari rele utama dan rele *backup* bernilai 0,2 s - 0,4 s.

Tabel 4. 11 Nilai TDS dan *Ipickup* kondisi 2

Rele	TDS Manual	<i>Ipick up</i>
R1	0,186	4,079
R2	0,308	2,625
R3	0,222	2,625
R4	0,179	2,625
R5	0,111	2,625
R6	0,110	2,625
R7	0,187	4,531
R8	0,260	3,342

diasumsikan nilainya berkisar dari 0,025 sampai 1,2 oleh karena itu dipilih nilai 0,03 untuk asumsi nilai TDS awal.

❖ **Rele 6 (forward)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 2960 A
FLA	: 300 A
CT ratio	: 400/5

• **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 300 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 300$$

$$315 \leq I_{pp} \leq 315$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 315$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{\text{CT Ratio}} = \frac{315}{400/5} = 3,938$$

• **Time Dial Setting**

Asumsi nilai $\text{TDS}_{(1)} = 0,03$

$$\begin{aligned} \text{top } R6_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,03}{\left[\left(\frac{2960}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$= 0,092$$

❖ **Rele 5 (forward)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 2550 A
Isc max <i>backup</i>	: 956 A
FLA	: 300 A
CT ratio	: 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 300 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 300$$

$$315 \leq I_{pp} \leq 420$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 315$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{315}{400 / 5} = 3,938$$

- **Time Dial Setting**

$$t_{R5(1)} = 0,092 \text{ s} + 0,22 \text{ s}$$

$$= 0,312 \text{ s}$$

$$t_{R5(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,312 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{956}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,050$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R5(1) &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,050}{\left[\left(\frac{2960}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$= 0,164 \text{ s}$$

- ❖ **Rele 4 (forward)**

Manufacturer : GE Multilin

Model : F650

Kurva Type : IEC – Curva A

Isc max utama : 3300 A

Isc max *backup* : 2550 A

FLA : 300 A

CT ratio : 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 300 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 300$$

$$315 \leq I_{pp} \leq 420$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 315$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{315}{400 / 5} = 3,938$$

- **Time Dial Setting**

$$t_{R4(1)} = 0,164 \text{ s} + 0,22 \text{ s}$$

$$= 0,384 \text{ s}$$

$$t_{R4(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,384 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{2550}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,117$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R4_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,117}{\left[\left(\frac{3300}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$= 0,341 \text{ s}$$

- ❖ **Rele 3 (forward)**

Manufacturer : GE Multilin

Model : F650

Kurva Type : IEC – Curva A

Isc max utama : 3440 A

Isc max *backup* : 2330 A

FLA : 299,56 A

CT ratio : 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 299,56 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 299,56$$

$$340,001 \leq I_{pp} \leq 419,384$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 340,001$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{315}{400 / 5} = 4,250$$

- **Time Dial Setting**

$$t R3_{(1)} = 0,341 \text{ s} + 0,22 \text{ s}$$

$$= 0,561 \text{ s}$$

$$t R3_{(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,561 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{2330}{340,001} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,157$$

- **Waktu Operasi**

$$\text{top } R3_{(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= \frac{0,14 \times 0,157}{\left[\left(\frac{3440}{340,001} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= 0,465 \text{ s}$$

- ❖ **Rele 2 (forward)**

Manufacturer : GE Multilin

Model : F650

Kurva Type : IEC – Curva A

Isc max utama : 4430 A

Isc max *backup* : 2860 A

FLA : 300 A

CT ratio : 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 300 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 300$$

$$315 \leq I_{pp} \leq 420$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 315$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{315}{400 / 5} = 3,938$$

- **Time Dial Setting**

$$t_{R2(1)} = 0,465 \text{ s} + 0,22 \text{ s}$$

$$= 0,685 \text{ s}$$

$$t_{R2(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,685 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{2860}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,221$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R2_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,221}{\left[\left(\frac{4430}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$= 0,569 \text{ s}$$

- ❖ **Rele 1 (forward)**

Manufacturer : GE Multilin

Model : F650

Kurva Type : IEC – Curva A

Isc max utama : 4350 A

Isc max *backup* : 2620 A

FLA : 621,6 A

CT ratio : 800/5

- **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned}
 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\
 1,05 \times 621,6 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 621,6 \\
 652,68 &\leq I_{pp} \leq 870,24 \\
 \text{Dipilih } I_{pp} &= 652,68
 \end{aligned}$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{653,625}{800/5} = 4,079$$

- **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned}
 t R1_{(1)} &= 0,569 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\
 &= 0,789 \text{ s}
 \end{aligned}$$

$$t R1_{(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,789 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{2620}{652,68} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,159$$

- **Waktu Operasi**

$$\text{top } R1_{(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= \frac{0,14 \times 0,159}{\left[\left(\frac{4350}{652,68} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= 0,575 \text{ s}$$

- ❖ **Rele 6 (forward)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 2960 A
Isc max <i>backup</i>	: 429 A
FLA	: 300 A
CT ratio	: 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 300 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 300$$

$$315 \leq I_{pp} \leq 420$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 315$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{315}{400 / 5} = 3,938$$

- **Time Dial Setting**

$$t R6_{(1)} = 0,575 \text{ s} + 0,22 \text{ s}$$

$$= 0,795 \text{ s}$$

$$t R6_{(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,795 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{429}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,035$$

- **Waktu Operasi**

$$\text{top } R6_{(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= \frac{0,14 \times 0,035}{\left[\left(\frac{2960}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= 0,108 \text{ s}$$

Iterasi dilakukan terus menerus sampai nilai $\text{TDS}_{(n)} = \text{TDS}_{(n-1)}$ sehingga didapatkan hasil nilai *error* dari nilai TDS setiap rele mendekati nol.

□ **Setting dan koordinasi pada counter clockwise relays**

➤ **Iterasi ke 1**

Untuk langkah awal harus memilih rele mana yang akan di *setting* pertama kali. Pada perhitungan ini dipilih rele 11. Untuk nilai TDS

diasumsikan nilainya berkisar dari 0,025 sampai 1,2 oleh karena itu dipilih nilai 0,03 untuk asumsi nilai TDS awal.

❖ **Rele 11 (reverse)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 2880 A
FLA	: 281,9 A
CT ratio	: 400/5

• **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned}
 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\
 1,05 \times 281,9 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 281,9 \\
 295,995 &\leq I_{pp} \leq 394,66 \\
 \text{Dipilih } I_{pp} &= 295,995 \\
 \text{Tap} &= \frac{I_{pp}}{\text{CT Ratio}} = \frac{295,995}{400/5} = 3,7
 \end{aligned}$$

• **Time Dial Setting**

Asumsi nilai $\text{TDS}_{(1)} = 0,03$

$$\begin{aligned}
 \text{top R11}_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{\text{sc max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 &= \frac{0,14 \times 0,03}{\left[\left(\frac{2880}{295,995} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 &= 0,090
 \end{aligned}$$

❖ **Rele 10 (reverse)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 3750 A
Isc max <i>backup</i>	: 2280 A
FLA	: 268,19 A
CT ratio	: 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 268,19 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 268,19$$

$$281,6 \leq I_{pp} \leq 375,446$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 281,6$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{281,6}{400 / 5} = 3,52$$

- **Time Dial Setting**

$$t R10_{(1)} = 0,090 \text{ s} + 0,22 \text{ s}$$

$$= 0,310 \text{ s}$$

$$t R10_{(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,310 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{2820}{281,6} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,095$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R10_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,095}{\left[\left(\frac{3750}{281,6} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$= 0,249 \text{ s}$$

- ❖ **Rele 9 (reverse)**

Manufacturer : GE Multilin

Model : F650

Kurva Type : IEC – Curva A

Isc max utama : 4410 A

Isc max *backup* : 2820 A

FLA : 300 A

CT ratio : 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 300 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 300$$

$$315 \leq I_{pp} \leq 420$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 315$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{315}{400 / 5} = 3,938$$

- **Time Dial Setting**

$$t R9_{(1)} = 0,249 \text{ s} + 0,22 \text{ s}$$

$$= 0,469 \text{ s}$$

$$t R9_{(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,469 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{2820}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,150$$

- **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned} \text{top } R9_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,150}{\left[\left(\frac{4410}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$= 0,388 \text{ s}$$

- ❖ **Rele 8 (reverse)**

Manufacturer : GE Multilin

Model : F650

Kurva Type : IEC – Curva A

Isc max utama : 5840 A

Isc max *backup* : 4410 A

FLA : 300 A

CT ratio : 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 300 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 300$$

$$315 \leq I_{pp} \leq 420$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 315$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{315}{400 / 5} = 3,938$$

- **Time Dial Setting**

$$t_{R8(1)} = 0,388 \text{ s} + 0,22 \text{ s}$$

$$= 0,608 \text{ s}$$

$$t_{R8(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,608 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{4410}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,235$$

- **Waktu Operasi**

$$\text{top } R8(1) = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= \frac{0,14 \times 0,235}{\left[\left(\frac{5840}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= 0,548 \text{ s}$$

- ❖ **Rele 7 (reverse)**

Manufacturer : GE Multilin

Model : F650

Kurva Type : IEC – Curva A

Isc max utama : 4820 A

Isc max *backup* : 3800 A

FLA : 690,5 A

CT ratio : 800/5

- **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 690,5 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 690,5$$

$$725,025 \leq I_{pp} \leq 966,7$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 725,025$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{725,025}{400/5} = 4,531$$

- **Time Dial Setting**

$$t_{R7(1)} = 0,548 \text{ s} + 0,22 \text{ s}$$

$$= 0,768 \text{ s}$$

$$t_{R7(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,768 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{3800}{725,025} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,185$$

- **Waktu Operasi**

$$\text{top } R7_{(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= \frac{0,14 \times 0,185}{\left[\left(\frac{4820}{725,025} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= 0,67 \text{ s}$$

- ❖ **Rele 12 (reverse)**

Manufacturer : GE Multilin

Model : F650

Kurva Type : IEC – Curva A

Isc max utama : 2420 A

Isc max *backup* : 751 A

FLA : 300 A

CT ratio : 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 300 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 300$$

$$315 \leq I_{pp} \leq 420$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 315$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{315}{400/5} = 3,938$$

- **Time Dial Setting**

$$t R12_{(1)} = 0,67 \text{ s} + 0,22 \text{ s}$$

$$= 0,89 \text{ s}$$

$$t R12_{(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,89 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{751}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,111$$

- **Waktu Operasi**

$$\text{top } R12_{(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= \frac{0,14 \times 0,115}{\left[\left(\frac{2420}{315} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= 0,375 \text{ s}$$

- ❖ **Rele 11 (reverse)**

Manufacturer : GE Multilin

Model : F650

Kurva Type : IEC – Curva A

Isc max utama : 2880 A

Isc max *backup* : 561 A

FLA : 281,9 A

CT ratio : 400/5

- **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 281,9 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 281,9$$

$$295,995 \leq I_{pp} \leq 394,66$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 295,995$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{295,995}{400 / 5} = 3,7$$

- **Time Dial Setting**

$$t_{R11(1)} = 0,375 \text{ s} + 0,22 \text{ s}$$

$$= 0,595 \text{ s}$$

$$t_{R11(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,595 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{561}{295,995} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,055$$

- **Waktu Operasi**

$$\text{top } R11_{(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= \frac{0,14 \times 0,055}{\left[\left(\frac{2880}{295,995} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= 0,164 \text{ s}$$

Iterasi dilakukan terus menerus sampai nilai $\text{TDS}_{(n)} = \text{TDS}_{(n-1)}$ sehingga didapatkan hasil nilai *error* dari nilai TDS setiap rele mendekati nol.

Perhitungan dengan menggunakan iterasi hanya digunakan pada rele yang berada dalam sistem *ring*. Oleh karena itu rele 13, dan rele 15 yang letaknya berada diluar sistem *ring* dan berfungsi untuk melindungi pembangkit menggunakan perhitungan manual tanpa adanya iterasi.

❖ **Rele 13 (reverse)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
Kurva Type	: IEC – Curva A
Isc max <i>backup</i>	: 4190 A
FLA	: 1732 A
CT ratio	: 2000/5

• **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned}
 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\
 1,05 \times 1732 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 1732 \\
 1818,6 &\leq I_{pp} \leq 2424,8 \\
 \text{Dipilih } I_{pp} &= 1905,2 \\
 \text{Tap} &= \frac{I_{pp}}{\text{CT Ratio}} = \frac{1905,2}{2000/5} = 4,763
 \end{aligned}$$

• **Time Dial Setting**

Rele 13 merupakan rele *backup* dari rele 7 dan rele 1. Rele 7 mempunyai waktu operasi 0,711 s, sedangkan rele 1 mempunyai waktu operasi 0,579 s. Karena rele 13 menjadi *backup* paling akhir maka dipilih waktu operasi rele 7 yang bernilai lebih besar.

$$\begin{aligned}
 t_{R13} &= 0,711 \text{ s} + 0,2 \text{ s} \\
 &= 0,911 \text{ s} \\
 t_{R13} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 0,911 &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{4190}{1905,2} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 \text{TDS} &= 0,103
 \end{aligned}$$

❖ **Rele 15 (forward)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
Kurva Type	: IEC – Curva A
Isc max <i>backup</i>	: 603 A
FLA	: 173,2 A
CT ratio	: 200/5

- **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 173,2 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 173,2$$

$$181,86 \leq I_{pp} \leq 242,48$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 190,52$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{190,52}{200/5} = 4,763$$

- **Time Dial Setting**

Rele 15 merupakan rele *backup* dari rele 3 dan rele 11. Rele 3 mempunyai waktu operasi 0,471 s, sedangkan rele 11 mempunyai waktu operasi 0,169 s. Karena rele 15 menjadi *backup* paling akhir maka dipilih waktu operasi rele 3 yang bernilai lebih besar.

$$t_{R15} = 0,471 \text{ s} + 0,2 \text{ s}$$

$$= 0,671 \text{ s}$$

$$t_{R15} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,671 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{603}{190,52} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS} = 0,112$$

Perhitungan diatas merupakan nilai acuan yang akan digunakan dalam *software* ETAP 12.6.0. Untuk rele berbasis *microprocessor*, *Overtravel time* dari rele adalah 0,2 s - 0,4 s. Sehingga pada kurva TCC nilai TDS maupun *Ipick up* bisa digeser secara manual agar jarak waktu operasi dari rele utama dan rele *backup* bernilai 0,2 s - 0,4 s.

Tabel 4. 13 Nilai TDS dan *Ipickup* kondisi 3

Rele	TDS Manual	<i>Ipick up</i>
R1	0,160	4,079
R2	0,224	3,938
R3	0,166	4,250
R4	0,130	3,938

Gambar 4.4 menunjukkan *single line diagram* kondisi *grid on*. Pada perhitungan ini akan dilakukan koordinasi pada *clockwise relays* dan koordinasi pada *counter clockwise relays*.

❑ Setting dan koordinasi pada clockwise relays

➤ Iterasi ke 1

Untuk langkah awal harus memilih rele mana yang akan di *setting* pertama kali. Pada perhitungan ini dipilih rele 6. Untuk nilai TDS diasumsikan nilainya berkisar dari 0,025 sampai 1,2 oleh karena itu dipilih nilai 0,03 untuk asumsi nilai TDS awal.

❖ Rele 6 (forward)

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
Kurva Type	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 2760 A
FLA	: 164,6 A
CT ratio	: 400/5

• Low Set Current Setting

$$1,05 \times \text{FLA} \leq \text{Ipp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 164,6 \leq \text{Ipp} \leq 1,4 \times 164,6$$

$$172,83 \leq \text{Ipp} \leq 230,44$$

$$\text{Dipilih Ipp} = 172,83$$

$$\text{Tap} = \frac{\text{Ipp}}{\text{CT Ratio}} = \frac{172,83}{400 / 5} = 2,16$$

• Time Dial Setting

Asumsi nilai $\text{TDS}_{(1)} = 0,03$

$$\begin{aligned} \text{top R6}_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{\text{Isc max}}{\text{Ipp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,03}{\left[\left(\frac{2760}{172,83} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= 0,074 \end{aligned}$$

❖ **Rele 5 (forward)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
Kurva Type	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 2260 A
Isc max <i>backup</i>	: 754 A
FLA	: 170 A
CT ratio	: 400/5

• **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 170 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 170$$

$$178,5 \leq I_{pp} \leq 238$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 178,5$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{\text{CT Ratio}} = \frac{178,5}{400 / 5} = 2,231$$

• **Time Dial Setting**

$$t_{R5(1)} = 0,074 \text{ s} + 0,22 \text{ s}$$

$$= 0,294 \text{ s}$$

$$t_{R5(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,294 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{754}{178,5} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,061$$

• **Waktu Operasi**

$$\text{top } R5(1) = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= \frac{0,14 \times 0,061}{\left[\left(\frac{2260}{178,5} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= 0,165 \text{ s}$$

❖ **Rele 4 (forward)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 2970 A
Isc max <i>backup</i>	: 2260 A
FLA	: 170 A
CT ratio	: 400/5

• **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 170 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 170$$

$$178,5 \leq I_{pp} \leq 238$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 178,5$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{\text{CT Ratio}} = \frac{178,5}{400 / 5} = 2,231$$

• **Time Dial Setting**

$$t_{R4(1)} = 0,165 \text{ s} + 0,22 \text{ s}$$

$$= 0,385 \text{ s}$$

$$t_{R4(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,385 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{2260}{178,5} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,143$$

• **Waktu Operasi**

$$\text{top } R4_{(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= \frac{0,14 \times 0,143}{\left[\left(\frac{2970}{178,5} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= 0,347 \text{ s}$$

❖ **Rele 3 (forward)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
Kurva Type	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 2920 A
Isc max <i>backup</i>	: 1890 A
FLA	: 170 A
CT ratio	: 400/5

• **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned}
 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\
 1,05 \times 170 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 170 \\
 178,5 &\leq I_{pp} \leq 238 \\
 \text{Dipilih } I_{pp} &= 178,5
 \end{aligned}$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{\text{CT Ratio}} = \frac{178,5}{400 / 5} = 2,231$$

• **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned}
 t_{R3(1)} &= 0,347 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\
 &= 0,567 \text{ s}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t_{R3(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 0,567 &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{1890}{178,5} \right)^{0,02} - 1 \right]}
 \end{aligned}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,196$$

• **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned}
 \text{top } R3(1) &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 &= \frac{0,14 \times 0,196}{\left[\left(\frac{2920}{178,5} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 &= 0,476 \text{ s}
 \end{aligned}$$

❖ **Rele 2 (forward)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
Kurva Type	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 4350 A
Isc max <i>backup</i>	: 2920 A
FLA	: 170 A
CT ratio	: 400/5

• **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 170 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 170$$

$$178,5 \leq I_{pp} \leq 238$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 178,5$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{\text{CT Ratio}} = \frac{178,5}{400 / 5} = 2,231$$

• **Time Dial Setting**

$$t R2_{(1)} = 0,476 \text{ s} + 0,22 \text{ s}$$

$$= 0,696 \text{ s}$$

$$t R2_{(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,696 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{2920}{178,5} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,286$$

• **Waktu Operasi**

$$\text{top } R2_{(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= \frac{0,14 \times 0,286}{\left[\left(\frac{4350}{178,5} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= 0,607 \text{ s}$$

❖ **Rele 1 (forward)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 4290 A
Isc max <i>backup</i>	: 2650 A
FLA	: 621,6 A
CT ratio	: 800/5

• **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned}
 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\
 1,05 \times 621,6 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 621,6 \\
 652,68 &\leq I_{pp} \leq 870,24 \\
 \text{Dipilih } I_{pp} &= 652,68 \\
 \text{Tap} &= \frac{I_{pp}}{\text{CT Ratio}} = \frac{652,68}{800/5} = 4,079
 \end{aligned}$$

• **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned}
 t R1_{(1)} &= 0,607 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\
 &= 0,827 \text{ s} \\
 t R1_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 0,827 &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{2650}{652,68} \right)^{0,02} - 1 \right]}
 \end{aligned}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,168$$

• **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned}
 \text{top } R1_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 &= \frac{0,14 \times 0,168}{\left[\left(\frac{4290}{652,68} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 &= 0,612 \text{ s}
 \end{aligned}$$

❖ **Rele 6 (forward)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
Kurva Type	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 2760 A
Isc max <i>backup</i>	: 375 A
FLA	: 164,6 A
CT ratio	: 400/5

• **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 164,6 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 164,6$$

$$172,83 \leq I_{pp} \leq 230,44$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 172,83$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{\text{CT Ratio}} = \frac{172,83}{400 / 5} = 2,16$$

• **Time Dial Setting**

$$t_{R6(1)} = 0,612 \text{ s} + 0,22 \text{ s}$$

$$= 0,832 \text{ s}$$

$$t_{R6(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,832 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{375}{172,83} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,093$$

• **Waktu Operasi**

$$\text{top } R6(1) = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= \frac{0,14 \times 0,093}{\left[\left(\frac{2760}{172,83} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= 0,228 \text{ s}$$

Iterasi dilakukan terus menerus sampai nilai $TDS_{(n)} = TDS_{(n-1)}$ sehingga didapatkan hasil nilai *error* dari nilai TDS setiap rele mendekati nol.

□ **Setting dan koordinasi pada counter clockwise relays**

➤ **Iterasi ke 1**

Untuk langkah awal harus memilih rele mana yang akan di *setting* pertama kali. Pada perhitungan ini dipilih rele 11. Untuk nilai TDS diasumsikan nilainya berkisar dari 0,025 sampai 1,2 oleh karena itu dipilih nilai 0,03 untuk asumsi nilai TDS awal.

❖ **Rele 11 (reverse)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
Kurva Type	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 2450 A
FLA	: 170 A
CT ratio	: 400/5

• **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times FLA \leq I_{pp} \leq 1,4 \times FLA$$

$$1,05 \times 170 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 170$$

$$178,5 \leq I_{pp} \leq 238$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 178,5$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{178,5}{400 / 5} = 2,231$$

• **Time Dial Setting**

Asumsi nilai $TDS_{(1)} = 0,03$

$$\begin{aligned} \text{top } R11_{(1)} &= \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ &= \frac{0,14 \times 0,03}{\left[\left(\frac{2450}{178,5} \right)^{0,02} - 1 \right]} \end{aligned}$$

$$= 0,078$$

❖ **Rele 10 (reverse)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 3800 A
Isc max <i>backup</i>	: 2450 A
FLA	: 170 A
CT ratio	: 400/5

• **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 170 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 170$$

$$178,5 \leq I_{pp} \leq 238$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 178,5$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{\text{CT Ratio}} = \frac{178,5}{400 / 5} = 2,231$$

• **Time Dial Setting**

$$t_{R10(1)} = 0,078 \text{ s} + 0,22 \text{ s}$$

$$= 0,298 \text{ s}$$

$$t_{R10(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,298 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{2450}{178,5} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,115$$

• **Waktu Operasi**

$$\text{top } R10(1) = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= \frac{0,14 \times 0,115}{\left[\left(\frac{3800}{178,5} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= 0,254 \text{ s}$$

❖ **Rele 9 (reverse)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
Kurva Type	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 4310 A
Isc max <i>backup</i>	: 2790 A
FLA	: 282,3 A
CT ratio	: 400/5

• **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned}
 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\
 1,05 \times 282,3 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 282,3 \\
 296,415 &\leq I_{pp} \leq 395,22 \\
 \text{Dipilih } I_{pp} &= 296,415 \\
 \text{Tap} &= \frac{I_{pp}}{\text{CT Ratio}} = \frac{296,415}{400/5} = 3,705
 \end{aligned}$$

• **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned}
 t R9_{(1)} &= 0,254 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\
 &= 0,474 \text{ s} \\
 t R9_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 0,474 &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{2790}{296,415} \right)^{0,02} - 1 \right]}
 \end{aligned}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,155$$

• **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned}
 \text{top } R9_{(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 &= \frac{0,14 \times 0,155}{\left[\left(\frac{4310}{296,415} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 &= 0,395 \text{ s}
 \end{aligned}$$

❖ **Rele 8 (reverse)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
Kurva Type	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 5670 A
Isc max <i>backup</i>	: 4310 A
FLA	: 254,6 A
CT ratio	: 400/5

• **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned}
 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\
 1,05 \times 254,6 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 254,6 \\
 267,33 &\leq I_{pp} \leq 356,44 \\
 \text{Dipilih } I_{pp} &= 267,645 \\
 \text{Tap} &= \frac{I_{pp}}{\text{CT Ratio}} = \frac{267,33}{400 / 5} = 3,342
 \end{aligned}$$

• **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned}
 t_{R8(1)} &= 0,395 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\
 &= 0,615 \text{ s} \\
 t_{R8(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 0,615 &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{4310}{267,33} \right)^{0,02} - 1 \right]}
 \end{aligned}$$

$$TDS_{(1)} = 0,251$$

• **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned}
 \text{top } R8(1) &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 &= \frac{0,14 \times 0,251}{\left[\left(\frac{5670}{267,33} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 &= 0,559 \text{ s}
 \end{aligned}$$

❖ **Rele 7 (reverse)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
Kurva Type	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 4610 A
Isc max <i>backup</i>	: 3640 A
FLA	: 690,5 A
CT ratio	: 800/5

• **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 690,5 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 690,5$$

$$725,025 \leq I_{pp} \leq 966,7$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 725,025$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{\text{CT Ratio}} = \frac{725,025}{400 / 5} = 4,531$$

• **Time Dial Setting**

$$t_{R7(1)} = 0,559 \text{ s} + 0,22 \text{ s}$$

$$= 0,779 \text{ s}$$

$$t_{R7(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,768 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{3800}{725,025} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,182$$

• **Waktu Operasi**

$$\text{top } R7(1) = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= \frac{0,14 \times 0,185}{\left[\left(\frac{4820}{725,025} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= 0,678 \text{ s}$$

❖ **Rele 12 (reverse)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
<i>Kurva Type</i>	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 2070 A
Isc max <i>backup</i>	: 550 A
FLA	: 169,65 A
CT ratio	: 400/5

• **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned}
 1,05 \times \text{FLA} &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA} \\
 1,05 \times 169,65 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 169,65 \\
 197,794 &\leq I_{pp} \leq 237,51 \\
 \text{Dipilih } I_{pp} &= 197,794 \\
 \text{Tap} &= \frac{I_{pp}}{\text{CT Ratio}} = \frac{197,794}{400/5} = 2,46
 \end{aligned}$$

• **Time Dial Setting**

$$\begin{aligned}
 t_{R12(1)} &= 0,678 \text{ s} + 0,22 \text{ s} \\
 &= 0,898 \text{ s} \\
 t_{R12(1)} &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 0,898 &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{550}{197,794} \right)^{0,02} - 1 \right]}
 \end{aligned}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,133$$

• **Waktu Operasi**

$$\begin{aligned}
 \text{top } R12(1) &= \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 &= \frac{0,14 \times 0,133}{\left[\left(\frac{2070}{197,794} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 &= 0,387 \text{ s}
 \end{aligned}$$

❖ **Rele 11 (reverse)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
Kurva Type	: IEC – Curva A
Isc max utama	: 2450 A
Isc max <i>backup</i>	: 289 A
FLA	: 170 A
CT ratio	: 400/5

• **Low Set Current Setting**

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{pp} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 170 \leq I_{pp} \leq 1,4 \times 170$$

$$178,5 \leq I_{pp} \leq 238$$

$$\text{Dipilih } I_{pp} = 178,5$$

$$\text{Tap} = \frac{I_{pp}}{\text{CT Ratio}} = \frac{178,5}{400 / 5} = 2,231$$

• **Time Dial Setting**

$$t_{R11(1)} = 0,387 \text{ s} + 0,22 \text{ s}$$

$$= 0,607 \text{ s}$$

$$t_{R11(1)} = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$0,607 = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{289}{178,5} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS}_{(1)} = 0,042$$

• **Waktu Operasi**

$$\text{top } R11(1) = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{\left[\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= \frac{0,14 \times 0,042}{\left[\left(\frac{2450}{178,5} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= 0,109 \text{ s}$$

Iterasi dilakukan terus menerus sampai nilai $TDS_{(n)} = TDS_{(n-1)}$ sehingga didapatkan hasil nilai *error* dari nilai TDS setiap rele mendekati nol.

Perhitungan dengan menggunakan iterasi hanya digunakan pada rele yang berada dalam sistem *ring*. Oleh karena itu rele 13 yang letaknya berada diluar sistem *ring* dan berfungsi untuk melindungi pembangkit menggunakan perhitungan manual tanpa adanya iterasi.

❖ **Rele 13 (reverse)**

Manufacturer	: GE Multilin
Model	: F650
Kurva Type	: IEC – Curva A
Isc max <i>backup</i>	: 4220 A
FLA	: 1732 A
CT ratio	: 2000/5

• **Low Set Current Setting**

$$\begin{aligned}
 1,05 \times FLA &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times FLA \\
 1,05 \times 1732 &\leq I_{pp} \leq 1,4 \times 1732 \\
 1818,6 &\leq I_{pp} \leq 2424,8 \\
 \text{Dipilih } I_{pp} &= 1905,2 \\
 \text{Tap} &= \frac{I_{pp}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{1905,2}{2000/5} = 4,763
 \end{aligned}$$

• **Time Dial Setting**

Rele 13 merupakan rele *backup* dari rele 7 dan rele 1. Rele 7 mempunyai waktu operasi 0,696 s, sedangkan rele 1 mempunyai waktu operasi 0,658 s. Karena rele 13 menjadi *backup* paling akhir maka dipilih waktu operasi rele 7 yang bernilai lebih besar.

$$\begin{aligned}
 t_{R13} &= 0,696 \text{ s} + 0,2 \text{ s} \\
 &= 0,896 \text{ s} \\
 t_{R13} &= \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{pp}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 0,896 &= \frac{0,14 \times TDS}{\left[\left(\frac{4220}{1905,2} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\
 TDS &= 0,103
 \end{aligned}$$

Tabel 4. 15 Nilai TDS dan *Ipick up* kondisi 4

Rele	TDS Manual	<i>Ipick up</i>
R1	0,180	4,079
R2	0,314	2,231
R3	0,223	2,231
R4	0,176	2,231
R5	0,100	2,231
R6	0,100	2,160
R7	0,190	4,531
R8	0,262	3,342
R9	0,166	3,705
R10	0,129	2,231
R11	0,044	2,231
R12	0,130	2,460
R13	0,110	4,763

4.4 Penggunaan ANN pada Koordinasi Proteksi Adaptif

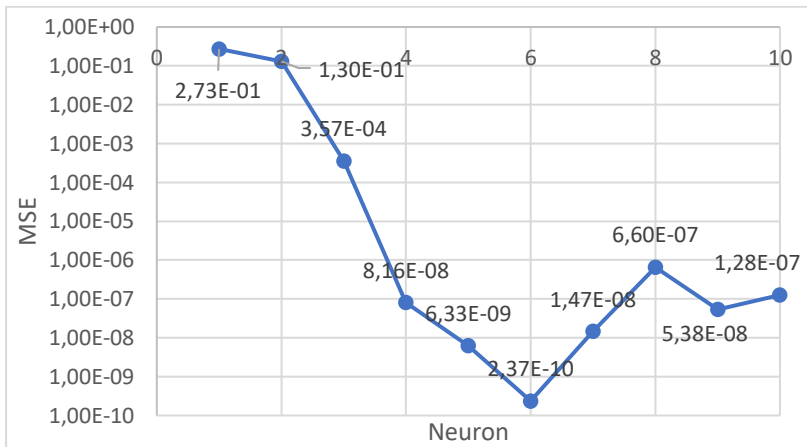
Artificial Neural Network digunakan agar rele mampu mengikuti perubahan kondisi yang ada pada sistem. Data *learning* yang digunakan terdiri dari data *input* dan data *output*. Data input berisi tentang kondisi pembangkit, kondisi dari beban, titik bus hubung singkat, jenis gangguan, dan besar arus yang mengalir pada rele. Sedangkan data *output* terdiri dari nilai TDS dan *Ipick up*.

Tahap selanjutnya yaitu melakukan *testing*. Langkah ini bertujuan untuk mendapatkan nilai *output*. Pada langkah ini nantinya dilakukan perbandingan nilai antara nilai *output* dari perhitungan manual dengan *output* dari program ini. Data yang diharapkan yaitu nilai *output* yang berasal dari nilai TDS manual dan *Ipick up* manual memiliki nilai yang mendekati sama dengan hasil TDS dan *Ipick up* menggunakan program *Artificial Neural Network*. Parameter-parameter yang digunakan dalam program adalah :

- Jumlah iterasi (*epoch*)
- Target *error*
- Jumlah *Hidden layer*
- Jumlah *neuron* pada *hidden layer*
- Fungsi aktivasi yang digunakan
- Algoritma Training

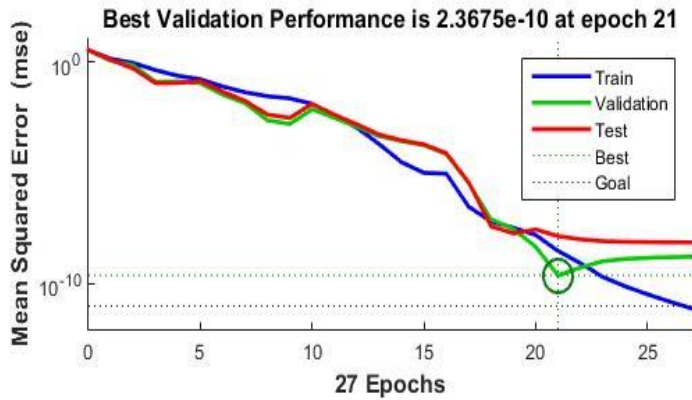
4.5 Hasil dan Analisa Hasil Koordinasi Proteksi dengan Menggunakan Artificial Neural Network

Pada *Artificial Neural Network* data yang diambil bersifat acak, oleh karena itu dilakukan percobaan dengan berbagai jumlah *neuron* sehingga didapatkan hasil yang diinginkan. Pada program ini digunakan dilakukan percobaan dengan menggunakan 1 *neuron* sampai 10 *neuron*. Pada setiap penggunaan *neuron* dilakukan percobaan sebanyak 5 kali lalu dipilih nilai yang paling bagus. Pada Gambar 4.5 dibawah ini akan digambarkan mengenai analisa dari data yang didapat.



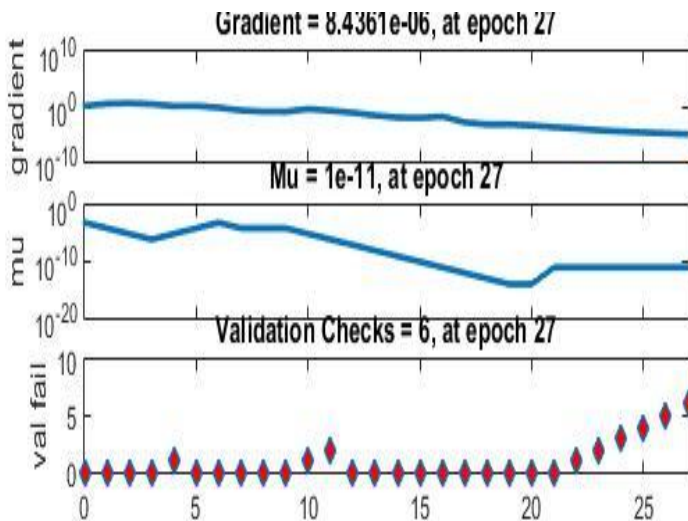
Gambar 4. 5 Nilai dari Neuron dan MSE

Pada gambar Gambar 4.5 menunjukan bahwa pada *neuron* 6 memiliki nilai yang palik bagus dibandingkan dengan *neuron* lain. Hal ini dikarena pada *neural network* harus memiliki jumlah *neuron* yang tepat untuk medapatkan hasil yang diinginkan sehingga harus dilakukan percobaan dengan dengan berbagai jumlah *neuron*.



Gambar 4. 6 Plot *Performance 6 Neuron*

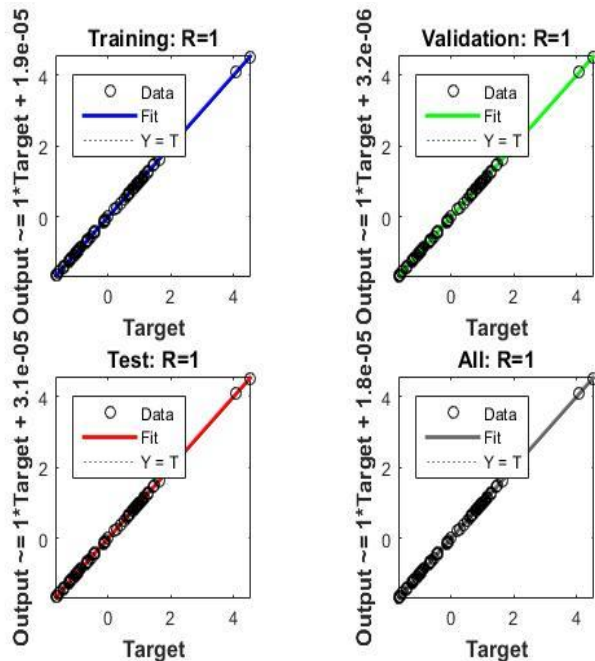
Pada gambar Gambar 4.6 menjelaskan mengenai plot *performance* dalam percobaan dengan menggunakan 6 *neuron*. Dengan target error $1e^{-11}$, didapatkan hasil nilai *Mean Squared Error* (MSE) sebesar $2,3675e^{-10}$ dan proses berhenti pada iterasi ke 21.



Gambar 4. 7 Plot *Training State 6 Neuron*

Pada gambar Gambar 4.7 menjelaskan mengenai plot *training state* dalam percobaan dengan menggunakan 6 *neuron*. Nilai *gradient* berhenti pada iterasi ke 27 dengan nilai $8,4361e^{-06}$, sedangkan nilai μ berhenti di iterasi ke 27 dengan nilai $1e^{-11}$, dan *validation checks* berhenti di iterasi ke 27 dengan nilai 6.

Kinerja dari suatu jaringan syaraf setelah dilkaukan pelatihan dapat diukur dengan melihat *error* hasil pelatihan, validasi, dan testing terhadap sekumpulan data baru. Cara yang dapat dilakukan untuk evaluasi ini adalah dengan menggunakan analisis regresi terhadap respon jaringan dan target yang diharapkan. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.8 dibawah ini.



Gambar 4. 8 Plot Regression State 6 Neuron

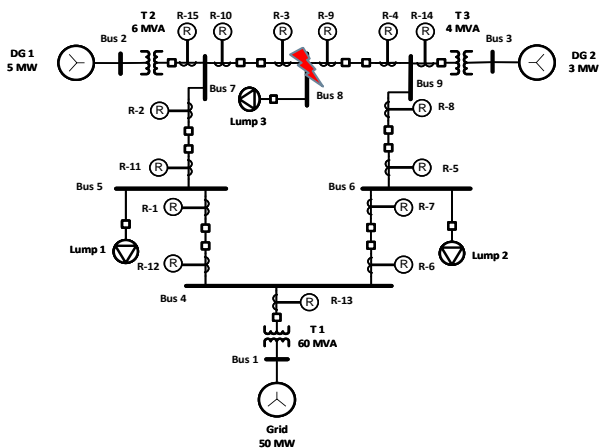
4.5.1 Hasil Koordinasi Saat Kondisi 1

Hasil perbandingan simulasi *Artificial Neural Network* dengan hasil dari perhitungan manual pada kondisi ini dapat dilihat pada tabel sebagai berikut.

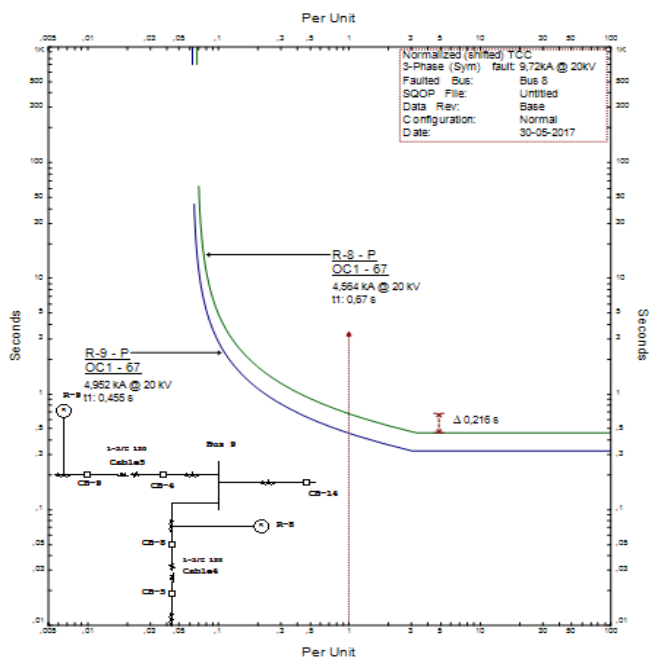
Tabel 4. 16 Hasil perhitungan manual dan algoritma NN kondisi 1

Rele	<i>Ipickup</i> Manual	<i>Ipickup</i> NN	TDS Manual	TDS NN
1	4,079	4,079000036	0,174	0,174000003
2	3,938	3,938000069	0,244	0,244000109
3	3,938	3,938000002	0,19	0,190000003
4	3,938	3,938000059	0,15	0,150000003
5	3,938	3,938000064	0,09	0,090000005
6	3,76	3,760000028	0,08	0,080000007
7	4,531	4,531000024	0,2	0,200000002
8	3,938	3,938000024	0,263	0,263000002
9	3,938	3,938000009	0,184	0,184000003
10	3,938	3,938000139	0,125	0,125000001
11	3,938	3,938000107	0,07	0,070000002
12	3,938	3,938000058	0,13	0,130000002
13	4,763	4,763000422	0,12	0,119999999
14	6,47	6,470001519	0,096	0,096000022
15	5,24	5,240000266	0,14	0,140000004
Total	64,285	64,28500283	2,256	2,256000158

Pada tabel diatas menunjukan bahwa hasil perhitungan manual dengan program NN memiliki hasil perbandingan dengan nilai *error* yang sangat kecil yaitu sebesar $2,826e^{-06}$ pada *Ipick up* dan $1,58e^{-07}$ pada TDS. Lalu nilai dari *output* tersebut akan disimulasikan menggunakan ETAP 12.6.0. Berikut merupakan simulasi dan kurva TCC ketika kondisi gangguan di bus 8 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9 dan 4.10.



Gambar 4. 9 Simulasi Ketika Terjadi Gangguan pada Bus 8



Gambar 4. 10 Kurva TCC Relé 9 Reverse dan Relé 8 Reverse

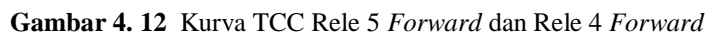
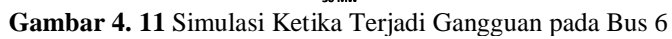
4.5.2 Hasil Koordinasi Saat Kondisi 2

Hasil perbandingan simulasi *Artificial Neural Network* dengan hasil dari perhitungan manual pada kondisi ini dapat dilihat pada tabel sebagai berikut.

Tabel 4. 17 Hasil perhitungan manual dan algoritma NN kondisi 2

Rele	<i>Ipickup</i> Manual	<i>Ipickup</i> NN	TDS Manual	TDS NN
1	4,079	4,0789994	0,186	0,185999995
2	2,625	2,625000599	0,308	0,307999979
3	2,625	2,624999876	0,222	0,221999993
4	2,625	2,625000002	0,179	0,178999985
5	2,625	2,625000674	0,111	0,110999979
6	2,625	2,624999875	0,110	0,109999994
7	4,531	4,530999511	0,187	0,187000004
8	3,342	3,342000064	0,260	0,259999999
9	3,705	3,705000037	0,172	0,171999995
10	2,625	2,625000707	0,120	0,120000002
11	2,625	2,624999976	0,039	0,119999973
12	2,625	2,625000013	0,120	0,120000001
13	4,763	4,763000003	0,110	0,109999999
14	4,620	4,619997796	0,130	0,129999929
Total	46,04	46,03999856	2,254	2,334999827

Pada tabel diatas menunjukan bahwa hasil perhitungan manual dengan program NN memiliki hasil perbandingan dengan nilai *error* yang sangat kecil yaitu sebesar $1,44e^{-06}$ pada *Ipick up* dan 0,080999827 pada TDS. Lalu nilai dari *output* tersebut akan disimulasikan menggunakan ETAP 12.6.0. Berikut merupakan simulasi dan kurva TCC ketika kondisi gangguan di bus 6 seperti yang ditunjukan pada Gambar 4.11 dan 4.12.



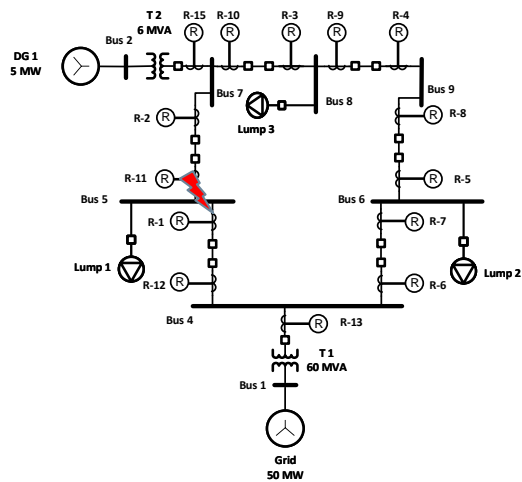
4.5.3 Hasil Koordinasi Saat Kondisi 3

Hasil perbandingan simulasi *Artificial Neural Network* dengan hasil dari perhitungan manual pada kondisi ini dapat dilihat pada tabel sebagai berikut.

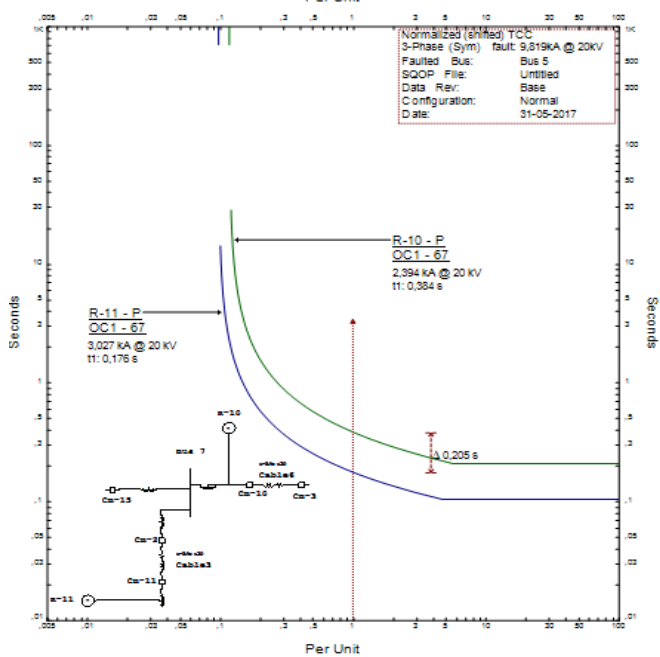
Tabel 4. 18 Hasil perhitungan manual dan algoritma NN kondisi 3

Rele	<i>Ipickup</i> Manual	<i>Ipickup</i> NN	TDS Manual	TDS NN
1	4,079	4,079000371	0,160	0,160000005
2	3,938	3,938000191	0,224	0,223999987
3	4,250	4,250000351	0,166	0,166000001
4	3,938	3,938000185	0,130	0,130000001
5	3,938	3,938000149	0,060	0,060000006
6	3,938	3,938000356	0,040	0,040000004
7	4,531	4,531000306	0,194	0,193999996
8	3,938	3,937999911	0,251	0,250999996
9	3,938	3,937999957	0,170	0,170000004
10	3,520	3,519999986	0,120	0,119999992
11	3,700	3,700000144	0,060	0,060000007
12	3,938	3,938000001	0,120	0,119999999
13	4,410	4,409999923	0,120	0,119999999
15	4,763	4,762998713	0,150	0,149999997
Total	56,819	56,81900055	1,965	1,965000057

Pada tabel diatas menunjukan bahwa hasil perhitungan manual dengan program NN memiliki hasil perbandingan dengan nilai *error* yang sangat kecil yaitu sebesar $5,53e^{-07}$ pada *Ipick up* dan $5,73e^{-08}$ pada TDS. Lalu nilai dari *output* tersebut akan disimulasikan menggunakan ETAP 12.6.0. Berikut merupakan simulasi dan kurva TCC ketika kondisi gangguan di bus 6 seperti yang ditunjukan pada Gambar 4.13 dan 4.14.



Gambar 4. 13 Simulasi Ketika Terjadi Gangguan pada Bus 5



Gambar 4. 14 Kurva TCC Relé 11 *Reverse* dan Relé 10 *Reverse*

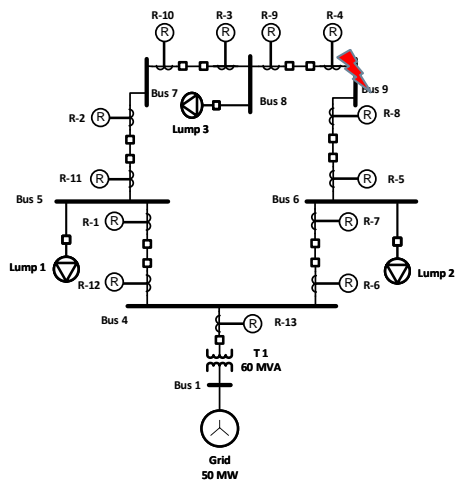
4.5.4 Hasil Koordinasi Saat Kondisi 4

Hasil perbandingan simulasi *Artificial Neural Network* dengan hasil dari perhitungan manual pada kondisi ini dapat dilihat pada tabel sebagai berikut.

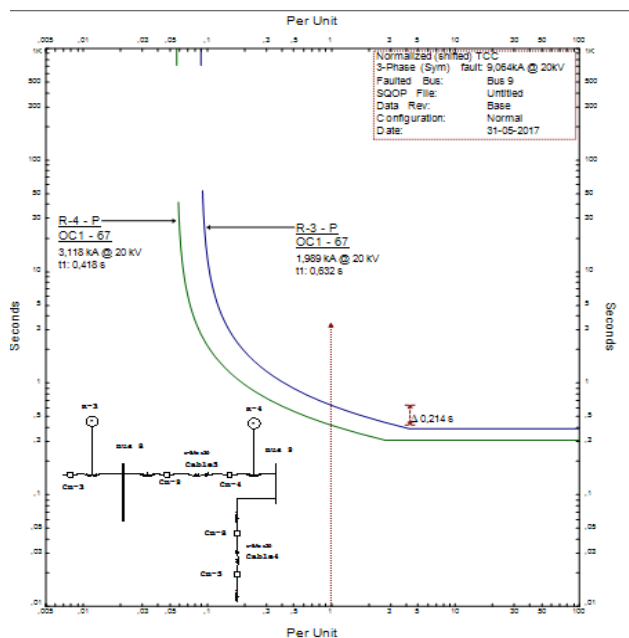
Tabel 4. 196 Hasil perhitungan manual dan algoritma NN kondisi 4

Rele	<i>Ipickup</i> Manual	<i>Ipickup</i> NN	TDS Manual	TDS NN
1	4,079	4,078830668	0,180	0,180000181
2	2,231	2,231013615	0,314	0,314002574
3	2,231	2,231058964	0,223	0,223001407
4	2,231	2,231083294	0,176	0,176000763
5	2,231	2,231038773	0,100	0,100002228
6	2,160	2,160020826	0,100	0,100003467
7	4,531	4,530900479	0,190	0,190000714
8	3,342	3,342005974	0,262	0,262000644
9	3,705	3,705004423	0,166	0,166001497
10	2,231	2,231094988	0,129	0,129000325
11	2,231	2,231090253	0,044	0,044003338
12	2,460	2,460030892	0,130	0,130000155
13	4,763	4,763030907	0,110	0,109999971
Total	38,426	38,42620406	2,124	2,124017264

Pada tabel diatas menunjukan bahwa hasil perhitungan manual dengan program NN memiliki hasil perbandingan dengan nilai *error* yang sangat kecil yaitu sebesar $2,04e^{-04}$ pada *Ipick up* dan $1,7264e^{-05}$ pada TDS. Lalu nilai dari *output* tersebut akan disimulasikan menggunakan ETAP 12.6.0. Berikut merupakan simulasi dan kurva TCC ketika kondisi gangguan di bus 6 seperti yang ditunjukan pada Gambar 4.15 dan 4.16.



Gambar 4. 15 Simulasi Ketika Terjadi Gangguan pada Bus 9



Gambar 4. 16 Kurva TCC Relé 4 Forward dan Relé 3 Forward

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan percobaan dan hasil simulasi yang sudah dilakukan pada koordinasi proteksi arus lebih adaptif dengan menggunakan *artificial neural network*, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Dengan kondisi DG di hubungkan dengan sistem maka nilai arus hubung singkat maksimum akan semakin besar, semakin banyak DG yang di hubungkan, semakin besar nilai arus hubung singkat maksimum yang terbaca oleh rele.
2. Model adaptif *setting* rele menggunakan ANN memperoleh nilai *setting* rele yang mampu menyesuaikan kondisi pembangkitan pada sistem.
3. Dalam proses *learning* maupun *testing* data yang diproses bersifat *random*, sehingga harus dilakukan beberapa kali percobaan. Dalam kasus ini dengan menggunakan 52 data pembelajaran di dapat nilai Mean Squared Error (MSE) = $2,37 \times 10^{-10}$ dengan menggunakan 6 neuron pada lapisan tersembunyi.

5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan dan analisa yang telah dilakukan, maka saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut :

1. Untuk penelitian selanjutnya dapat menambahkan kondisi dan parameter yang digunakan lebih banyak. Misal dengan memberikan parameter kondisi beban atau dengan penambahan kondisi ketika terjadi gangguan di saluran.
2. Karena tugas akhir ini bersifat riset maka diperlukan studi kasus pada kondisi di *plant* nyata.

~ Halaman ini sengaja dikosongkan ~

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Wahyudi, “*Diktat Kuliah Pengaman Sistem Tenaga Listrik*”, Teknik Elektro ITS, Surabaya, Bab 2, 2004.
- [2]. Husein, Dinan Ibnu, “*Setting Rele Arus Lebih Adaptif pada Sistem Distribusi Mesh dengan Pembangkit Tersebar berbasis Learning Vector Quantization Neural Network*”, Tugas Akhir. Institut Teknologi Sepuluh Nopember: Surabaya, 2016.
- [3]. Hasben, Rizky Fadhli, “*Koordinasi Proteksi Adaptif Rele Arus Lebih Digital Menggunakan Metode Artificial Neural Network Pada Sistem Mesh Dengan Pembangkit Tersebar*”, Tugas Akhir. Institut Teknologi Sepuluh Nopember: Surabaya, 2016.
- [4]. Thomas Ackerman, Goran Andersson, dan Lennart Soder, “*Distributed Generator: a definition*”, Electric Power Systems Research 57, Elsevier, 2001, pp.195-204.
- [5]. Purnomo, Mauridhi Hery., Kurniawan, Agus., “*Supervised Neural Network dan Aplikasinya*. Yogyakarta: Graha Ilmu, Mei 2006.
- [6]. Kusumadewi, Sri, “*Membangun Jaringan Syaraf Tiruan (Menggunakan MATLAB & EXCEL LINK)*”, Yogyakarta: Graha Ilmu, 2004.
- [7]. Hadi Zayandehroodi, Azah Mohamed, Hussain Shareef, Marjan Mohammadjafari, “*An Automated Protection Method for Distribution Networks with Distributed Generations Using Radial Basic Function Neural Network*”, The 5th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2011), 2011.
- [8]. H. H. Zineldin, Sharaf Hebatallah and friend, “*Optimal Protection Coordination for Meshed Distribution System With DG Using Dual Setting Directional Over-Current Relays*”, IEEE, Vol 6, No 1, January 2015.
- [9]. Soman, S.A. “*Directional Overcurrent Relay Coordination in Multi-loop*”. <http://nptel.ac.in/courses/108101039/20> (diakses tanggal 20 April 2017).
- [10]. Matin Meshkin, Karim Faez, Hossien Askarian Abyaneh, Farzad Razavi, “*A new optimal neural network relays co-ordination*”, Electrical Engineering Dept, IRAN.

~ Halaman ini sengaja dikosongkan ~

BIOGRAFI PENULIS



M. Alfian Fadli Jauhari, dilahirkan di Bojonegoro pada 11 Juni 1995. Merupakan anak pertama dari dua bersaudara pasangan Bapak Mukarom dan Ibu Siti Zayyanah. Masa kecil hingga jenjang SMA penulis habiskan di kota kecil yaitu Bojonegoro, Jawa Timur. Penulis mengawali pendidikan dasar di SDN 1 Panjunan, kemudian melanjutkan pendidikan jenjang selanjutnya di SMPN 1 Kalitidu, dan mengakhiri pendidikan sekolah menengah di SMAN 1 Bojonegoro. Setelah lulus SMA pada tahun 2013, penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya dengan Departemen Teknik Elektro bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Selain kegiatan perkuliahan, penulis aktif sebagai asisten di Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST). Disamping kegiatan akademik dan kegiatan laboratorium, penulis juga aktif dalam organisasi baik di lingkup departemen maupun institut, seperti sebagai Kepala Bidang Keanggotaan Divisi Kalpataru Elektro ITS, Kepala Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa (PSDM) HIMATEKTRO ITS periode 2015/2016, Kepala Divisi Humas UKM PSHT ITS. Selain kegiatan berorganisasi penulis juga aktif pada kegiatan kepanitiaan baik lingkup departemen maupun institut, misalnya Electra, EE Event, Redformation BEM FTI, IFC UKM Sepak Bola ITS, dan ITS EXPO. Penulis juga aktif diberbagai kegiatan pelatihan seperti LKMM praTD, LKMM TD, LKMM TM, Estra, Esdev, dll. Penulis dapat dihubungi melalui email malfianfadlijauhari@gmail.com.

~ Halaman ini sengaja dikosongkan ~

LAMPIRAN

LIST PROGRAM

```
%----Data Input dan Data Output----
filename = 'data_learning.xlsx';
Data = xlsread(filename);
data_input = Data(1:52,1:23)';
data_target = Data(1:52,24:53)';

S=[6 30];

%----Menyiapkan Data----
[Input_,IN] = mapstd(data_input);
[Target_,TG] = mapstd(data_target);
% [Input2_,IN2]=mapstd(data_input2);

%----Membangun Jaringan----
NN = newff(minmax(Input_),S,{'tansig','purelin'});

%----Melihat Bobot-Bobot Awal (Input, Lapisan, Bias)----
BobotAwal_Input      = NN.IW{1,1}
BobotAwal_Bias_Input  = NN.b{1,1}
BobotAwal_Lapisan     = NN.LW{2,1}
BobotAwal_Bias_Lapisan = NN.b{2,1}

%----Mengatur Parameter----
NN.divideFcn = 'dividerand' ;
NN.divideParam.trainRatio = 0.70;
NN.divideParam.valRatio = 0.15;
NN.divideParam.testRatio = 0.15;
NN.trainParam.epochs = 1000 ;
NN.trainParam.goal = 1e-11;
NN.trainParam.min_grad = 1e-20;
NN.trainParam.lr = 0.01;
% NN.trainParam.mc = 0.9;
%NN.trainParam.showWindow=false;

%----Melakukan Pembelajaran----
NN=trainlm(NN,Input_,Target_);

%----Melihat Bobot-Bobot Akhir (Input, Lapisan, Bias)----
BobotAkhir_Input      = NN.IW{1,1}
BobotAkhir_Bias_Input  = NN.b{1,1}
BobotAkhir_Lapisan     = NN.LW{2,1}
BobotAkhir_Bias_Lapisan = NN.b{2,1}
```

```
%----Melihat Hasil----  
Sim_NN = sim(NN,Input_);  
Rslt_NN = mapstd('reverse',Sim_NN,TG);  
  
[r1,m1,b1] = regression(Target_,Rslt_NN);
```

DATA BOBOT DAN BIAS

BOBOT INPUT					
-1,166081232	-0,397026149	0,46428144	-0,874058659	1,203760699	0,971466967
-0,268779033	1,794324964	0,976305153	-3,740072305	0,670936129	2,222020084
-0,082942814	0,015111481	3,876081269	-3,067445933	1,06405151	2,014890968
-1,166074727	-0,39704416	0,465267277	-0,874033646	1,203760772	0,971561892
-1,166076771	-0,397051652	0,465266364	-0,874031647	1,203760757	0,971559233
-1,166073314	-0,397051002	0,465266534	-0,874034633	1,203760766	0,971561729
-0,05272009	-6,19E-07	-2,73E-07	-3,63E-05	-0,195857485	0,000280941
-0,001262431	-2,19E-06	-3,49E-07	3,59E-05	-0,618481619	-0,00049939
-0,234054323	0,003612387	0,000481799	0,034600828	0,297530918	-0,569529605
0,258850604	-0,172926171	0,226550546	0,091113334	-0,283562384	0,213794942
-0,153275965	-0,0434391	0,16666834	0,182762253	0,327564864	0,010229515
-0,200293246	0,172545607	-0,226636052	0,043934984	0,128836587	-0,186675067
-0,117731559	-4,80E-05	-9,73E-06	-0,139397129	-0,06637499	0,363404404
0,217869411	0,043289075	-0,166698846	-0,0825317	0,089435921	-0,031729466
-0,424045408	-6,91E-05	-0,065194801	0,200097512	0,202924061	0,747354672
0,223129328	1,83E-05	4,36E-06	0,148682912	-0,149368286	-0,36359206
0,039824775	4,44E-05	0,00841308	0,049109484	-0,021528733	-0,084350903
-0,944600769	0,002407457	0,000336093	-0,48486216	-0,01665945	-0,374706937
0,023357099	-0,000132147	0,082302124	-0,204230107	0,33620439	-0,948689727
0,194169519	-5,30E-05	-0,008415937	-0,037016328	0,093556336	0,083206715
-0,779466844	4,90E-05	0,065211256	-0,185539868	0,034228275	-0,746152834
0,41315347	0,000119086	-0,084676795	0,240192571	0,039897396	0,968929798
0,592801372	8,28E-05	-1,004332067	0,003681742	-0,024129489	-0,961403324

BIAS INPUT
-2,481960343
-0,295572294
1,364170033
-2,602084877
4,446431512
1,838021044

BOBOT LAPISAN					
-4,578399443	9,42E-05	2,67049017	3,230296046	-0,600212704	0,224549633
4,064194772	2,183550962	-0,077342756	0,074663977	0,296722788	1,408482207
-0,53342562	2,045806477	-0,072458133	-0,097923227	-0,326781678	1,119039321
0,11006496	2,182044381	2,291745375	4,219713295	0,718768391	2,085334095
-0,535429047	1,652691514	-0,339951076	-0,692325948	-0,326075178	0,797959629
0,698730983	-1,220748962	1,810555769	1,88273074	-0,037719143	-0,515137881
-0,08140588	-1,57E-05	-7,92E-06	0,026269261	1,093650384	0,221177351
0,658206948	-1,35750191	1,767688716	1,67836619	0,658692101	-0,520337904
-0,439592593	2,005427085	0,323657616	0,176325286	-0,678617993	1,053325104
0,375618201	-1,920527681	0,485071175	-1,234154304	-0,478352091	-1,517592206
-0,054235155	-1,02E-05	-5,19E-06	0,017231165	0,641485264	0,145079617
-0,355546534	2,914106347	1,357058885	2,243267088	-0,402112732	2,006122713
-0,504573667	1,865778334	-0,066080073	-0,27940824	-0,35686539	0,955173991
0,693087694	-1,207117596	1,915163056	1,883865673	0,087343166	-0,498845801
-0,518924377	1,865775518	-0,066081488	-0,27472447	-0,147022496	0,994609653
0,64031436	-1,781083264	0,667412761	0,77593215	-0,120795765	-0,994822968
-0,378860083	2,102024718	0,652121706	0,56354887	-0,619303666	1,132624291
0,18605644	1,445118836	1,517743118	3,454139056	0,032052378	1,480581782
-0,487951344	2,280821818	0,144647232	0,321139339	-0,590690678	1,241514504
-0,580553359	2,104194032	-0,237716872	-0,142326289	-0,219414553	1,201452538
-0,537126372	2,18194336	-0,077279904	0,051110904	-0,29278265	1,209597745
-0,010499407	1,951649959	2,402971355	2,50050043	-0,408118528	1,384328208
-0,55161613	1,681765819	-0,493463085	-0,782461606	-0,662333685	0,776080479
0,643250859	-1,465845449	1,24560587	1,445318581	0,163132045	-0,627482491
-0,547800564	2,181941383	-0,077280913	0,054464828	-0,178588206	1,237836413
0,529792502	0,690091033	2,972183485	3,941767596	0,383476729	0,996982675
-0,489543036	1,865781714	-0,066078431	-0,284790459	-0,730308318	0,909857047
0,625305026	-1,576589371	1,236400567	1,313761784	0,295092824	-0,656548998
0,292809035	0,708575278	2,66529471	2,277441831	0,003868601	0,60135928
0,408674708	-0,642120489	1,991327611	0,968572944	-0,113169409	-0,374878961

BIAS LAPISAN
-3,041806895
3,662471715
-0,178252965
0,422655794
-0,36445674
1,120425721
2,709042183
0,204415913
0,349978528
0,355692308
3,707435414
0,666833688
-0,172677424
0,950499092
-0,431621752
0,982529684
0,459424549
1,134726108
0,327414225
-0,354947295
-0,136834788
0,912200044
-0,014295297
0,747812522
-0,286587334
1,016785669
0,25572952
0,488957652
0,649611942
0,492791198

- Hasil perhitungan manual untuk mencari nilai TDS kondisi 1

Iterasi 1			Iterasi 2			Iterasi 3			Iterasi 4			Iterasi 5			Iterasi 6			
relay	TOP	relay	top+TCI	TMS	TOP	top+TCI	TMS	TOP	top+TCI	TMS	TOP	top+TCI	TMS	TOP	top+TCI	TMS	TOP	
1			6	0,807	0,074	0,214	6	0,842	0,077	0,2233	6	0,844	0,078	0,224	6	0,844	0,078	0,224
2			1	0,800	0,165	0,587	1	0,847	0,174	0,6217	1	0,850	0,175	0,624	1	0,850	0,175	0,624
3			2	0,698	0,226	0,580	2	0,754	0,245	0,6267	2	0,758	0,246	0,630	2	0,758	0,246	0,630
4			3	0,576	0,168	0,478	3	0,644	0,188	0,5341	3	0,649	0,189	0,538	3	0,649	0,189	0,538
5			4	0,404	0,122	0,356	4	0,481	0,146	0,4238	4	0,486	0,147	0,429	4	0,487	0,147	0,429
6	0,03	0,087	5	0,307	0,060	0,184	5	0,434	0,085	0,2609	5	0,443	0,086	0,266	5	0,444	0,087	0,267
Iterasi 1			Iterasi 2			Iterasi 3			Iterasi 4			Iterasi 5			Iterasi 6			
Relay	TOP	relay	top+TCI	TMS	TOP	top+TCI	TMS	TOP	top+TCI	TMS	TOP	top+TCI	TMS	TOP	top+TCI	TMS	TOP	
11			11	0,602	0,063	0,190	11	0,624	0,065	0,197	11	0,626	0,066	0,198	11	0,626	0,066	0,198
12			12	0,887	0,115	0,382	12	0,939	0,122	0,404	12	0,943	0,123	0,406	12	0,943	0,123	0,406
7			7	0,768	0,185	0,667	7	0,827	0,199	0,719	7	0,832	0,200	0,723	7	0,832	0,200	0,723
8			8	0,611	0,235	0,548	8	0,678	0,261	0,607	8	0,682	0,263	0,612	8	0,683	0,263	0,612
10			9	0,470	0,155	0,391	9	0,550	0,182	0,458	9	0,555	0,184	0,462	9	0,556	0,184	0,463
11	0,03	0,091	10	0,311	0,093	0,250	10	0,410	0,122	0,330	10	0,417	0,124	0,335	10	0,418	0,125	0,336
R-15			R-13			R-14												

0,123 R-15

0,106 R-13

0,096 R-14

- Hasil perhitungan manual untuk mencari nilai TDS kondisi 2

Iterasi 1				Iterasi 2				Iterasi 3				Iterasi 4				Iterasi 5				Iterasi 6						
relay	TOP	relay	top+TCI	TMS	TOP	Top+TCI	TMS	TOP	Top+TCI	TMS	TOP	Top+TCI	TMS	TOP	Top+TCI	TMS	TOP	Top+TCI	TMS	TOP	Top+TCI	TMS	TOP			
		6	0,832	0,100	0,256	6	0,884	0,106	0,272	6	0,889	0,107	0,274	6	0,889	0,107	0,274	6	0,889	0,107	0,274	6	0,889	0,107	0,274	
1		1	0,826	0,170	0,612	1	0,896	0,184	0,664	1	0,902	0,186	0,669	1	0,903	0,186	0,669	1	0,903	0,186	0,669	1	0,903	0,186	0,669	
2		2	0,699	0,274	0,606	2	0,780	0,305	0,676	2	0,787	0,308	0,682	2	0,788	0,308	0,683	2	0,788	0,308	0,683	2	0,788	0,308	0,683	
3		3	0,576	0,188	0,479	3	0,673	0,219	0,560	3	0,682	0,222	0,567	3	0,682	0,222	0,568	3	0,682	0,222	0,568	3	0,682	0,222	0,568	
4		4	0,401	0,138	0,356	4	0,510	0,175	0,453	4	0,520	0,179	0,462	4	0,521	0,179	0,462	4	0,521	0,179	0,462	4	0,521	0,179	0,462	
6	0,03	0,077	5	0,297	0,067	0,181	5	0,476	0,107	0,290	5	0,492	0,110	0,300	5	0,494	0,111	0,301	5	0,494	0,111	0,301	5	0,494	0,111	0,301

Iterasi 1				Iterasi 2				Iterasi 3				Iterasi 4				Iterasi 5				Iterasi 6						
Relay	TOP	relay	top+TCI	TMS	TOP	Top+TCI	TMS	TOP	Top+TCI	TMS	TOP	Top+TCI	TMS	TOP	Top+TCI	TMS	TOP	Top+TCI	TMS	TOP	Top+TCI	TMS	TOP			
12		11	0,621	0,039	0,106	11	0,627	0,039	0,107	11	0,628	0,039	0,107	11	0,628	0,039	0,107	11	0,628	0,039	0,107	11	0,628	0,039	0,107	
7		12	0,898	0,138	0,401	12	0,911	0,140	0,407	12	0,911	0,140	0,408	12	0,911	0,140	0,408	12	0,911	0,140	0,408	12	0,911	0,140	0,408	
8		7	0,780	0,184	0,678	7	0,795	0,187	0,691	7	0,796	0,187	0,691	7	0,796	0,187	0,691	7	0,796	0,187	0,691	7	0,796	0,187	0,691	
9		8	0,620	0,253	0,560	8	0,637	0,259	0,575	8	0,638	0,260	0,576	8	0,638	0,260	0,576	8	0,638	0,260	0,576	8	0,638	0,260	0,576	
10		9	0,476	0,162	0,400	9	0,496	0,169	0,417	9	0,497	0,169	0,418	9	0,497	0,169	0,418	9	0,497	0,169	0,418	9	0,497	0,169	0,418	
11	0,03	0,082	10	0,302	0,111	0,256	10	0,326	0,119	0,276	10	0,327	0,120	0,277	10	0,327	0,120	0,277	10	0,327	0,120	0,277	10	0,327	0,120	0,277

0,102

0,089

R-13

R-14

0,103 R-13

0,089 R-14

- Hasil perhitungan manual untuk mencari nilai TDS kondisi 3

Iterasi 1						Iterasi 2						Iterasi 3						Iterasi 4						Iterasi 5						Iterasi 6						R-15
relay	TOP	relay	Top+TCI	TMS	TOP	Top+TCI	TMS	TOP		Top+TCI	TMS	TOP		Top+TCI	TMS	TOP		Top+TCI	TMS	TOP		Top+TCI	TMS	TOP		Top+TCI	TMS	TOP		Top+TCI	TMS	TOP				
1		6	0,795	0,035	0,108	6	0,799	0,035	0,108	6	0,799	0,035	0,108	6	0,799	0,035	0,108	6	0,799	0,035	0,108	6	0,799	0,035	0,108	6	0,799	0,035	0,108	6	0,799	0,035	0,108			
2		1	0,789	0,159	0,575	1	0,794	0,160	0,579	1	0,794	0,160	0,579	1	0,794	0,160	0,579	1	0,794	0,160	0,579	1	0,794	0,160	0,579	1	0,794	0,160	0,579	1	0,794	0,160	0,579			
3		2	0,685	0,221	0,569	2	0,691	0,223	0,574	2	0,691	0,223	0,574	2	0,691	0,223	0,574	2	0,691	0,223	0,574	2	0,691	0,223	0,574	2	0,691	0,223	0,574	2	0,691	0,223	0,574			
4		3	0,561	0,157	0,465	3	0,568	0,159	0,471	3	0,568	0,159	0,471	3	0,568	0,159	0,471	3	0,568	0,159	0,471	3	0,568	0,159	0,471	3	0,568	0,159	0,471	3	0,568	0,159	0,471			
5		4	0,384	0,117	0,341	4	0,392	0,120	0,348	4	0,392	0,120	0,348	4	0,392	0,120	0,348	4	0,392	0,120	0,348	4	0,392	0,120	0,348	4	0,392	0,120	0,348	4	0,392	0,120	0,348			
6	0,03	0,092	5	0,312	0,050	0,164	5	0,328	0,053	0,172	5	0,328	0,053	0,172	5	0,328	0,053	0,172	5	0,328	0,053	0,172	5	0,328	0,053	0,172	5	0,328	0,053	0,172	5	0,328	0,053	0,172		
Iterasi 1						Iterasi 2						Iterasi 3						Iterasi 4						Iterasi 5						Iterasi 6						R-13
Relay	TOP	relay	Top+TCI	TMS	TOP	Top+TCI	TMS	TOP		Top+TCI	TMS	TOP		Top+TCI	TMS	TOP		Top+TCI	TMS	TOP		Top+TCI	TMS	TOP		Top+TCI	TMS	TOP		Top+TCI	TMS	TOP				
12		11	0,595	0,055	0,164	11	0,611	0,056	0,169	11	0,612	0,056	0,169	11	0,612	0,056	0,169	11	0,612	0,056	0,169	11	0,612	0,056	0,169	11	0,612	0,056	0,169	11	0,612	0,056	0,169			
7		12	0,890	0,111	0,375	12	0,929	0,116	0,391	12	0,931	0,117	0,392	12	0,931	0,117	0,392	12	0,931	0,117	0,392	12	0,931	0,117	0,392	12	0,931	0,117	0,392	12	0,931	0,117	0,392			
8		7	0,768	0,185	0,670	7	0,812	0,195	0,709	7	0,815	0,196	0,711	7	0,815	0,196	0,711	7	0,815	0,196	0,711	7	0,815	0,196	0,711	7	0,815	0,196	0,711	7	0,815	0,196	0,711			
9		8	0,608	0,235	0,548	8	0,657	0,254	0,592	8	0,660	0,256	0,595	8	0,661	0,256	0,595	8	0,661	0,256	0,595	8	0,661	0,256	0,595	8	0,661	0,256	0,595	8	0,661	0,256	0,595			
10		9	0,469	0,150	0,388	9	0,529	0,169	0,437	9	0,533	0,170	0,440	9	0,533	0,171	0,441	9	0,533	0,171	0,441	9	0,533	0,171	0,441	9	0,533	0,171	0,441	9	0,533	0,171	0,441			
11	0,03	0,090	10	0,310	0,095	0,249	10	0,384	0,117	0,309	10	0,389	0,119	0,313	10	0,389	0,119	0,313	10	0,389	0,119	0,313	10	0,389	0,119	0,313	10	0,389	0,119	0,313	10	0,389	0,119	0,313		

0,112 R-15

0,108 R-13

- Hasil perhitungan manual untuk mencari nilai TDS kondisi 4

Iterasi 1						Iterasi 2						Iterasi 3						Iterasi 4						Iterasi 5						Iterasi 6							
relay		TOP	relay	top+TCI	TMS	TOP	Top+TCI	TMS	TOP			Top+TCI	TMS	TOP				Top+TCI	TMS	TOP				Top+TCI	TMS	TOP				Top+TCI	TMS	TOP					
			6	0,832	0,093	0,228	6	0,875	0,098	0,240		6	0,878	0,098	0,241			6	0,878	0,098	0,241			6	0,878	0,098	0,241			6	0,878	0,098	0,241				
			1	0,827	0,168	0,612	1	0,884	0,179	0,655		1	0,888	0,180	0,658			1	0,889	0,180	0,658			1	0,889	0,180	0,658			1	0,889	0,180	0,658				
			2	0,696	0,286	0,607	2	0,762	0,313	0,664		2	0,767	0,315	0,668			2	0,767	0,315	0,669			2	0,767	0,315	0,669			2	0,767	0,315	0,669				
			3	0,567	0,196	0,476	3	0,645	0,222	0,542		3	0,650	0,225	0,547			3	0,651	0,225	0,547			3	0,651	0,225	0,547			3	0,651	0,225	0,547				
			4	0,385	0,143	0,347	4	0,472	0,175	0,425		4	0,478	0,178	0,430			4	0,479	0,178	0,431			4	0,479	0,178	0,431			4	0,479	0,178	0,431				
	0,03	0,074	5	0,294	0,061	0,165	5	0,448	0,094	0,252		5	0,460	0,096	0,258			5	0,461	0,096	0,259			5	0,461	0,096	0,259			5	0,461	0,096	0,259				
Iterasi 1						Iterasi 2						Iterasi 3						Iterasi 4						Iterasi 5						Iterasi 6							
Relay		TOP	relay	Top+TCI	TMS	TOP	Top+TCI	TMS	TOP			Top+TCI	TMS	TOP				Top+TCI	TMS	TOP				Top+TCI	TMS	TOP				Top+TCI	TMS	TOP					
12			11	0,607	0,042	0,109	11	0,614	0,042	0,111		11	0,615	0,043	0,111			11	0,615	0,043	0,111			11	0,615	0,043	0,111			11	0,615	0,043	0,111				
7			12	0,898	0,133	0,387	12	0,915	0,136	0,394		12	0,916	0,136	0,395			12	0,916	0,136	0,395			12	0,916	0,136	0,395			12	0,916	0,136	0,395				
8			7	0,779	0,182	0,678	7	0,799	0,187	0,695		7	0,800	0,187	0,696			7	0,800	0,187	0,696			7	0,800	0,187	0,696			7	0,800	0,187	0,696				
9			8	0,615	0,251	0,559	8	0,638	0,260	0,579		8	0,639	0,261	0,580			8	0,639	0,261	0,580			8	0,639	0,261	0,580			8	0,639	0,261	0,580				
10			9	0,474	0,155	0,395	9	0,501	0,164	0,418		9	0,502	0,164	0,419			9	0,502	0,164	0,419			9	0,502	0,164	0,419			9	0,502	0,164	0,419				
11	0,03	0,078	10	0,298	0,115	0,254	10	0,329	0,126	0,281		10	0,331	0,127	0,282			10	0,331	0,127	0,282			10	0,331	0,127	0,282			10	0,331	0,127	0,282				

0,103 R-13

0,108 R-13